

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



**Měřicí a vizualizační systém pro měření
environmentálních veličin s využitím technologie IQRF**

**Measuring and Visualization System for Measuring
Environmental Quantities using IQRF Technology**

2018

Bc. Jan Velička

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Velička**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma: **Měřicí a vizualizační systém pro měření environmentálních veličin s využitím technologie IQRF**
Measuring and Visualization System for Measuring Environmental Quantities using IQRF Technology

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor měření vybraných environmentálních veličin.
2. Popis technologie IQRF.
3. Popis technologií pro zpracování a vizualizaci měřených dat.
4. Návrh a realizace výukového modulu pro měření environmentálních veličin.
5. Návrh měřicího řetězce.
6. Zpracování a vizualizace měřených dat prostřednictvím vybrané technologie.
7. Testování vytvořeného měřicího systému.
8. Zhodnocení výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HARRISON, R. Giles. *Meteorological Measurements and Instrumentation*. Wiley-Blackwell, 2015. 257 s. ISBN 978-1-118-74580-9.
- [2] MICRORISC s.r.o. *IQRF Quick Start Guide For IQRF OS v3.07D and higher*. 2017. [online] Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [3] MICRORISC s.r.o. *IQRF OS Operating System Version 4.00D for (DC)TR-7xD - User's Guide*. 2017. [online] Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [4] MICRORISC s.r.o. *IQRF DPA Framework Technical Guide v3.00*. 2017. [online] Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.
- [5] MICRORISC s.r.o. *IQRF Cloud Technical guide*. 2015. [online] Dostupné z: <http://www.iqrf.org>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

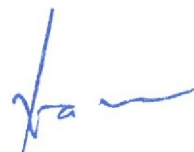
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Pieš, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2018



.....
podpis studenta

Poděkování

Dovoluji si tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinu Piešovi, Ph.D, za odborné vedení, cenné rady, připomínky a za čas, který mi věnoval při zpracovávání této diplomové práce.

Abstrakt

S rozvojem moderních technologií a materiálů a mnohdy také z ekonomických důvodů dochází v některých případech ke zhoršování pracovního prostředí, což může vést až ke zdravotním problémům. Jedním z faktorů je zvýšená koncentrace CO₂ vlivem dokonalejšího zatěsnění pláště budov. Proto je nutné monitorovat ovzduší v pobytových prostorách a na základě zjištěných dat provést účinná opatření. Proto je předmětem této diplomové práce návrh a implementace měřicího přístroje a výukových modulů pro monitorování vybraných environmentálních veličin v místnostech za použití technologie IQRF. Měřené veličiny jsou koncentrace oxidu uhličitého, teplota, vlhkost, atmosférický tlak. Senzory jsou připojeny k IQRF transceiverům pomocí sběrnice I²C. Tyto IQRF transceivery mezi sebou komunikují prostřednictvím IQMESH sítě. Komunikace v této IQMESH síti využívá DPA protokol. Naměřená data jsou ukládána do MySQL databáze. Vizualizace dat probíhá v prostředí Node-RED a Grafana.

Klíčová slova

Měřicí systém; měřicí přístroj; koncentrace CO₂; teplota; vlhkost; atmosférický tlak; výukový modul; senzor; kvalita ovzduší; IQRF; IQMESH; DPA; Node-RED; MQTT; MySQL; Raspberry Pi 3; AAEON UpBoard; I²C; Grafana; Databáze; Internet of Things

Abstract

With the development of modern technologies and materials, and sometimes also for economic reasons, the work environment is deteriorating in some cases, which can lead to health problems. One factor is an increased CO₂ concentration due to a better sealing of the building envelope. It is therefore necessary to monitor the air in the living quarters and, on the basis of the data, to take effective measures. That is why the subject of this thesis is the design and implementation of a measuring instrument and training modules for monitoring of selected environmental quantities in rooms using IQRF technology. Measured quantity of carbon dioxide concentrations, temperature, humidity, atmospheric pressure. The sensors are connected to the IQRF transceivers via the I2C bus. These IQRF transceivers communicate with each other through the IQMESH network. Communication on this IQMESH network uses the DPA protocol. The measured data is stored in the MySQL database. Data visualization takes place in the Node-RED and Grafana environment.

Keywords

Measuring system; Measuring instrument; CO₂ concentration; temperature; humidity; atmospheric pressure; learning module; sensor; air quality; IQRF; IQMESH; DPA; Node-RED; MQTT; MySQL; Raspberry Pi 3; AAEON UpBoard; I²C; Grafana; Database; Internet of Things

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK	11
ÚVOD	13
1 TEORETICKÝ ROZBOR	14
1.1 MĚŘENÍ KONCENTRACE CO ₂	14
1.2 ELEKTROCHEMICKÉ SENZORY CO ₂	14
1.3 POLOVODIČOVÉ SENZORY CO ₂	15
1.4 OPTICKÉ SENZORY CO ₂	15
1.4.1 Nedisperzní IR senzor	15
1.4.2 Spektroskopická absorpční metoda	16
1.5 MĚŘENÍ TEPLoty	17
1.6 OXID UHLÍČITÝ	19
1.7 KONCENTRACE CO ₂ A LIDSKÝ ORGANISMUS	20
2 POUŽITÉ SENZORY	22
2.1 OXID UHLÍČITÝ - FIGARO CDM7160	22
2.1.1 Komunikace	22
2.1.2 Postup kalibrace	24
2.1.3 Testování senzoru	24
2.2 TEPLota, VLHKOST, ATMOSFÉRICKÝ TLAK - BOSCH BME280	25
2.3 TEPLota - MICROCHIP MCP9802	26
3 POPIS TECHNOLOGIE IQRf	27
3.1 IQRf OS	27
3.2 IQMESH	27
3.3 DPA PROTOKOL	28
3.4 CUSTOM DPA HANDLER	29
3.5 IQRf (DC)TR MODULY	29
3.6 UP BOARD GW	30
3.7 RASPBERRY Pi GW	30
3.8 BRÁNA - IQRf ETHERNET GATEWAY	31
4 POPIS TECHNOLOGIÍ PRO ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACI MĚŘENÝCH DAT	32
4.1 NODE-RED	32
4.2 MOSQUITTO	32
4.3 GRAFANA	33
5 NÁVRH MĚŘICÍHO SYSTÉMU	34
6 NÁVRH MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE	35
6.1 SPECIFIKACE	35
6.1.1 Varianty	36
6.2 NÁVRH RMCD	36
6.2.1 Komunikace s okolím	36
6.2.2 Napájení	38
6.2.3 Senzory	41
6.2.4 Podpůrné obvody	42
6.2.5 Deska plošných spojů	44
6.2.6 Postup osazování	44
6.2.7 Testování (testovací body)	46

6.2.8	Zápis programu	46
6.3	OVLÁDÁNÍ	47
7	NÁVRH VÝUKOVÝCH MODULŮ PRO MĚŘENÍ ENVIRONMENTÁLNÍCH VELIČIN	48
7.1	MODUL CO ₂ -EVAL	48
7.1.1	Napájení	48
7.1.2	Senzory	49
7.1.3	Ostatní obvody	50
7.1.4	Postup osazování	51
7.2	MODUL BME280-EVAL	53
7.2.1	Napájení	53
7.2.2	Senzor	54
7.2.3	Ostatní obvody	54
7.2.4	Postup osazování	55
7.3	ENERGETICKÁ BILANCE	56
7.4	CHYBY MĚŘENÍ	56
8	PROGRAM PRO OBSLUHU DPA	58
8.1	STAV INIT	58
8.2	STAV IDLE	58
8.3	STAV DPAREQUEST	58
8.4	BEFORESLEEP	58
8.5	AFTERSLEEP	58
8.6	SPECIFIKACE DPA KOMUNIKACE	58
8.7	PŘIPOJENÍ DO IQMESH	60
9	ZPRACOVÁNÍ A VIZUALIZACE MĚŘENÝCH DAT PROSTŘEDNICTVÍM VYBRANÉ TECHNOLOGIE	61
9.1	ZPRACOVÁNÍ A ARCHIVACE DAT	61
9.1.1	Koordinátor IQMESH sítě	61
9.1.2	Aplikace IQRF-Daemon	61
9.1.3	Aplikace v Node-RED	62
9.2	VIZUALIZACE PROSTŘEDNICTVÍM WEBOVÉHO ROZHRANÍ	62
9.2.1	Prostředí Grafana	62
9.2.2	Prostředí Node-RED - Dashboard	63
9.2.3	Zdroj dat – Data source	64
10	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT	65
10.1	METODIKA MĚŘENÍ	65
10.2	METODIKA VYHODNOCENÍ	65
11	TESTOVÁNÍ VYTVOŘENÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU	66
11.1	ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	66
11.2	VIZUALIZACE AKTUÁLNÍCH DAT	67
12	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	68
12.1	MOŽNOSTI DALŠÍHO ROZVOJE MĚŘICÍHO SYSTÉMU	69
	ZÁVĚR	71
	LITERATURA	73
	SEZNAM PŘÍLOH	74

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
-	B	Byte
-	b	bit
A	-	Absorbance
C	F	Kapacita
C_B	mAh	Kapacita baterie
C_{CO_2}	ppm	Koncentrace oxidu uhličitého
d	m	Délka
f	Hz	Frekvence
HC	osob	Počet osob
I	A	Proud
L	H	Indukčnost
P	W	Činný výkon
R	Ω	Odpor
RH	%	Relativní vlhkost
S	m ²	Plocha
\check{s}	m	Šířka
T	°C, K	Teplota
t	s, hod	Čas
U	V	Napětí
V	l, m ³	Objem
v	m	Výška
VPH	m ³ /os	Objem na osobu
Z	Ω	Impedance

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
CO ₂ , CD	Oxid uhličitý (Carbon Dioxide)
(DC)TR	Datý řízený přijmač/vysílač (Data Controled Transceiver)
DNP	Neosazovat (Do Not Place)
DPA	Přímý přístup k rozhraní (Direct Peripheral Access)
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Externí EEPROM
GFSK	Gauss Frequency Shift Keying
GW	Brána (GateWay)
HI	Vysoký (High)
I ² C	Mezi integrovanými obvody (Inter - Integrate Circuit), sběrnice
IAQ	Kvalita vnitřního vzduchu (Inner Air Quality)
IIR	Filtr s nekonečnou impulzní odezvou (infinite impulse response)
IoT	Internet věcí (Internet of Thinks)
IP	Stupeň elektrického krytí (International Protection)
IQRF	Intelligence Radio Frequency (Obchodní značka)
LDO	Nízko ztrátový (Low Drop Out)
LED	Světlo vyzařující dioda (Light Emiting Dioda)
LO	Nízký (Low)
LP	Nízko příkonový (Low Power)
M2M	Komunikace mezi zařízeními (stroji) (Machine To Machine)
MCLR	Externí reset (Master Clear pin)
MCU	Mikrokontrolér (Micro Controler Unit)
MQTT	(Message Queue Telemetry Transport)
NDIR	Nedisperní infračerveného záření (Non-Dispersive InfraRed)
Node	Uzel
NPK-P	Nejvyšší přípustná koncentrace
O ₂	Kyslík (Oxygen)
OOP	Objektově orientované programování
PEL	Povolený expoziční limit (vážený průměr za směnu)
ppm	Počet částic na milion (Parts Per Milion)
QoS	Kvalita služby (Quallity of Service)
RGB LED	Tříbarevná LED dioda (červená, zelená, modrá)
RH	Relativní vlhkost (Relativ Humidity)
RMCD	Pokojové měření CO ₂ (Room Measurement Carbon Dioxide)
RSSI	Received Signal Code Power
SMD	Součástka montována povrchově (Surface Mount Device)
SMT	Technologie povrchového osazování (Surface Mount Technologi)
SPI	Sériová rozhraní (Seriál Periferal Interface)
STD	Standard power
THD	Součástka s vývody skrz DPS (Trou Hole Device)
VOC	Těkavé organické látky (Volatile Organic Compound)
XLP	Vysoce nízko příkonový (Extrem Low Power)

Seznam ilustrací a tabulek

Obr. 1: Schéma elektrochemického senzoru	14
Obr. 2: Schéma polovodičového senzoru.....	15
Obr. 3: Schéma NDIR senzoru.....	16
Obr. 4: Schéma měřicí aparatury diferenční spektroskopické metody [1].....	16
Obr. 5: Spektrum absorpce infračerveného záření různými plyny [3]	17
Obr. 6: Zjednodušené schéma integrovaného senzoru teploty [4]	18
Obr. 7: Zjednodušený model molekuly oxidu uhličitého (CO ₂) – sféry, valenční elektrony.....	19
Obr. 8: Senzor CDM7160	22
Obr. 9: Topologie IQMESH sítě	28
Obr. 10: Schéma DPA komunikace Koordinátor - Uzel	29
Obr. 11: Přenos dat při použití jednodeskového počítače	30
Obr. 12: Přenos dat prostřednictvím brány na úložiště (cloud).....	31
Obr. 13: Ukázka kódu [Node-RED].....	32
Obr. 14: MQTT Broker - schéma.....	33
Obr. 15: Měřicí řetězec.....	34
Obr. 16: Fyzické schéma měřicího přístroje RMCD.....	35
Obr. 17: Topologické schéma měřicího přístroje RMCD	36
Obr. 18: Schéma zapojení (DC)TR-76 do obvodu.....	37
Obr. 19: (DC)TR-76 – rozloženo [10]	37
Obr. 20: Zapojení RGB LED	38
Obr. 21: Schéma zapojení piezo sirény	38
Obr. 22: Schéma zapojení uživatelského tlačítka.....	38
Obr. 23: Napájecí zdroj 5 V	39
Obr. 24: Schéma nabíjecího obvodu	40
Obr. 25: LDO stabilizátor 3,3 V.....	40
Obr. 26: Schéma připojení modulu MT3608 k RMCD.....	40
Obr. 27: Schéma zapojení obvodu ovládání napájení senzorů.....	41
Obr. 28: Schéma zapojení senzoru CDM7160 - CO ₂	41
Obr. 29: Schéma zapojení konektoru pro BME280	41
Obr. 30: Schéma zapojení senzoru MCP9802 - Teplota.....	42
Obr. 31: Zapojení převodníku TXS0104.....	42
Obr. 32: Schéma obvodu hlídání napětí baterie	43
Obr. 33: Schéma obvodu pro reset.....	43
Obr. 34: Schéma obvodu BOND.....	44
Obr. 35: Fotografie elektroniky přístroje RMCD (Pohled shora)	45
Obr. 36: Fotografie prototypu RMCD.....	45
Obr. 37: Připojení pro programování pomocí CK-USB.....	46
Obr. 38: Fyzické schéma DDC	48
Obr. 39: Fyzické schéma CO ₂ -EVAL	48
Obr. 40: Zapojení LDO stabilizátoru	49
Obr. 41: Zapojení spínání napájení senzorů.....	49
Obr. 42: Zapojení senzoru CO ₂	49
Obr. 43: Zapojení senzoru teploty.....	50
Obr. 44: Zapojení převodníku logických úrovní.....	50
Obr. 45: Zapojení blokovacích kondenzátorů	50

Obr. 46: Zapojení konektoru DK-EVAL-04x	51
Obr. 47: Zapojení indikačních LED	51
Obr. 48: Fotografie modulu CO ₂ -EVAL připojeného k DK-EVAL-04x (Pohled shora)	52
Obr. 49: Topologie BME280-EVAL	53
Obr. 50: Zapojení LDO stabilizátoru	53
Obr. 51: Zapojení spínání napájení senzoru	53
Obr. 52: Zapojení blokovacích kondenzátorů	54
Obr. 53: Zapojení konektoru DK-EVAL-04x (Vstupní, Výstupní)	54
Obr. 54: Zapojení indikační LED	55
Obr. 55: Fotografie modulu BME280-EVAL připojeného k DK-EVAL-04x (Pohled shora)	55
Obr. 56: Graf chyby měření CDM7160	56
Obr. 57: Graf chyby měření MCP9802	57
Obr. 58: Topologické schéma zpracování a archivace naměřených dat	61
Obr. 59: Schéma programu pro ukládání do MySQL databáze v prostředí Node-RED	62
Obr. 60: Jednoduchý webový ovládací panel koordinátora IQMESH sítě	62
Obr. 61: Ovládací prvky nastavení signalizace přenosu dat v prostředí Node-RED	62
Obr. 62: Okno vizualizace – souhrn	63
Obr. 63: Vizualizace - Záznam koncentrace CO ₂	63
Obr. 64: Webová vizualizace Node-RED	63
Obr. 65: Ukázka grafu kumulativní četnosti datového výběru - Koncentrace CO ₂	66
Obr. 66: Ukázka grafu kumulativní četnosti datového výběru - Teplota	67
Obr. 67: Ukázka grafu kumulativní četnosti datového výběru - Relativní vlhkost	67
Obr. 68: Vizualizace aktuálních hodnot měřených veličin	67
Obr. 69: Graf kumulativní četnosti datového výběru - Teplota	68
Obr. 70: Graf kumulativní četnosti datového výběru - Relativní vlhkost	69
Obr. 71: Graf kumulativní četnosti datového výběru - Koncentrace CO ₂	69
Tab. 1: Souhrnný přehled senzorů CO ₂ podle principů funkce [1]	14
Tab. 2: Souhrnný přehled kontaktních senzorů teploty [3]	17
Tab. 3: Vlastnosti oxidu uhličitého [5]	19
Tab. 4: Vlastnosti koncentrace CO ₂ [7]	20
Tab. 5: Spotřeba vzduchu v závislosti na činnosti [7], [5]	20
Tab. 6: Vlastnosti senzoru CDM7160	22
Tab. 7: Tabulka registrů a paměti CDM7160	23
Tab. 8: Popis pinů CDM7160	24
Tab. 9: Tabulka registrů BME280	25
Tab. 10: Tabulka registrů MCP9802	26
Tab. 11: Tabulka testovacích bodů RMCD	46
Tab. 12: Chyby měření při dodržení vztažných podmínek [8], [10], [11]	56
Tab. 13: Struktura tabulky v MySQL databázi	64
Tab. 14: Limitní hodnoty měřených veličin	65
Tab. 15: Srovnání výdrže baterie v různých režimech	66
Tab. 16: Parametry naměřených hodnot	68

Úvod

Cílem této práce je návrh a realizace měřicího a vizualizačního systému environmentálních veličin pro měření vnitřního prostředí v budovách. Pro účely diplomové práce byly k provedení měření zvoleny prostory, ve kterých probíhá výuka. Na základě takto získaných údajů je možné upravit režim větrání v místnosti. Přenos dat je realizován pomocí technologie IQRF.

Navržené zařízení je osazeno nedisperzním IR senzorem CO₂ a měřením teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku. Přenos dat je prostřednictvím sítě IQMESH. Toto zařízení je na rozdíl od komerčních výrobků možné napájet bateriově s možností dobíjení. Signalizace pomocí RGB LED umožňuje okamžitou kontrolu stavu zařízení. Sestavené zařízení je umístěno do ABS krabičky KM-84.

Sběr dat je realizován IQRF bránou na platformě Raspberry Pi, UP board nebo standardních bránách typu ETHERNET, WIFI nebo GSM. Data jsou sbírána pomocí DPA protokolu prostřednictvím IQMESH sítě s připojením na MQTT broker nebo IQRF cloud.

Pro zpracování naměřených dat je použito grafické prostředí Node-RED. Data jsou pro následné zpracování ukládána do MySQL databáze. Vizualizace dat je v prostředí Grafana.

Součástí práce je také návrh dvou výukových a prezentačních modulů pro měření environmentálních veličin, a to konkrétně CO₂-EVAL a BME280-EVAL. Navržené výukové moduly slouží jako výukový a demonstrační přípravek pro podporu výuky v oblasti návrhu a realizace měřicích systémů pro měření environmentálních veličin. První modul je určen pro měření koncentrace CO₂ a teploty. Druhý modul slouží k měření teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku. Moduly je možné používat jak samostatně, tak společně zařazené kaskádně. Oba moduly jsou svými rozměry a připojením koncipovány tak, aby mohly být zařaditelné do vývojového řetězce (DDC).

Diplomová práce je rozčleněna na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části je proveden rozbor měření vybraných environmentálních veličin a jsou zde popsány technologie IQRF a technologie pro zpracování a vizualizaci měřených dat.

Praktická část je zaměřena na několik dílčích úkolů.

Prvním úkolem je návrh měřicího řetězce a na jeho základě návrh a realizace měřicího přístroje a výukových modulů pro měření environmentálních veličin. Součástí je také uživatelský program pro obsluhu DPA protokolu.

Dále jsou zpracována a vizualizována naměřená data prostřednictvím vybrané technologie.

Na závěr jsou vyhodnocena data získaná prostřednictvím sestaveného měřicího systému a uvedeny možnosti dalšího rozvoje.

1 Teoretický rozbor

1.1 Měření koncentrace CO₂

Pro měření koncentrace CO₂ je možné použít několik principů, které jsou využity v senzorech. Nejčastěji čidla pracují na základě absorpce infračerveného záření, dále mohou čidla pracovat na elektroakustickém principu nebo na elektrochemickém principu nebo na principu změny vodivosti polovodiče. Každý z těchto principů má své výhody a nevýhody.

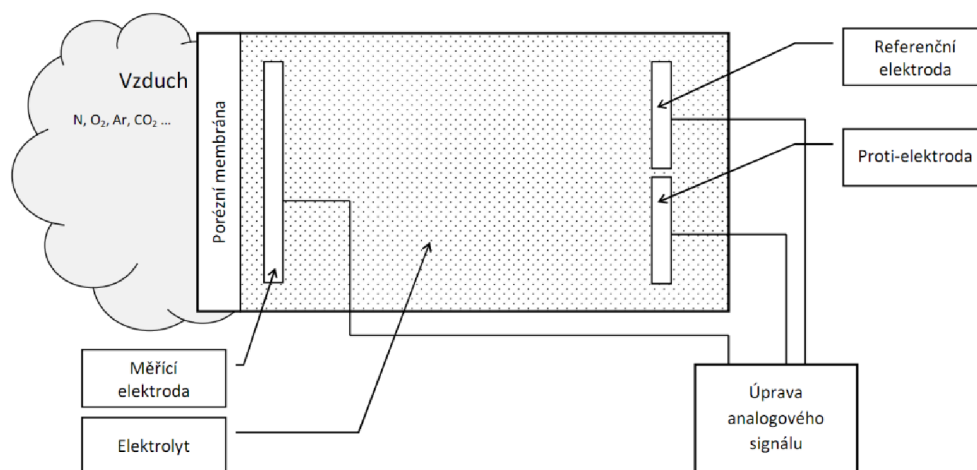
Tab. 1: Souhrnný přehled senzorů CO₂ podle principů funkce [1]

	optický NDIR	elektrochemický	elektroakustický	polovodičový
Životnost	++	--	++	-
Selektivita	++	+	-	--
Přesnost	++	+	+	--

Vzhledem k zaměření práce bude v následujících kapitolách věnována větší pozornost senzorům optického typu.

1.2 Elektrochemické senzory CO₂

Senzor vytváří měřicí signál úměrný koncentraci cílového plynu, který vzniká reakcí molekul cílového plynu s elektrolytem, který je uvnitř senzoru. Senzor pracuje jako palivový článek, spotřebovává kyslík ze vzduchu. Elektrolyt může být tekutý nebo pevný. Materiál elektrod a elektrolytu a napětí mezi elektrodami jsou zvoleny tak, aby na měřicí elektrodě docházelo k elektrochemické reakci doprovázené vznikem volných elektronů. Redukční a oxidační děje probíhající na elektrodách jsou zdrojem proudového signálu. Elektronický obvod měří a zesiluje tento velice nízký proudový signál, který odpovídá koncentraci cílového plynu. U tohoto typu senzoru je nutná koncentrace CO₂ nad 400 ppm. Toto pásmo necitlivosti je způsobeno nutností chemické reakce s elektrolytem.

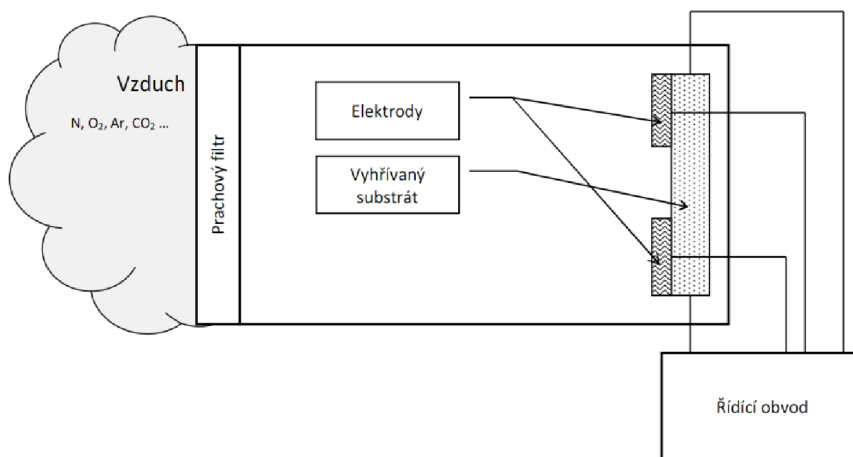


Obr. 1: Schéma elektrochemického senzoru

Dobré měřicí vlastnosti elektrochemického senzoru doprovází v případě CO₂ nevýhoda relativně krátké životnosti senzoru, která je přibližně 1 až 2 roky. Rychlejší stárnutí senzorů je způsobeno chemickými změnami vedoucími k postupnému vyčerpání elektrolytu. K rychlejšímu stárnutí senzorů přispívá expozice cílovému plynu. Tento typ senzorů proto není vhodný pro měření v trvale vysokých koncentracích cílového plynu.

1.3 Polovodičové senzory CO₂

Měření koncentrace cílového plynu je založeno na změně vodivosti polovodiče. Používanými materiály jsou převážně oxidy kovů (např. oxidy zinku, cínu, wolframu, india). Na povrchu tohoto polovodiče se vytvoří ve vzduchu rovnovážný stav s molekulami kyslíku, který se za přítomnosti jiného plynu poruší a způsobí změnu vodivosti. Nevýhodou je nutnost vyhřívání a z toho plynoucí energetická náročnost. Jedná se však o nejlevnější typ senzoru CO₂.



Obr. 2: Schéma polovodičového senzoru

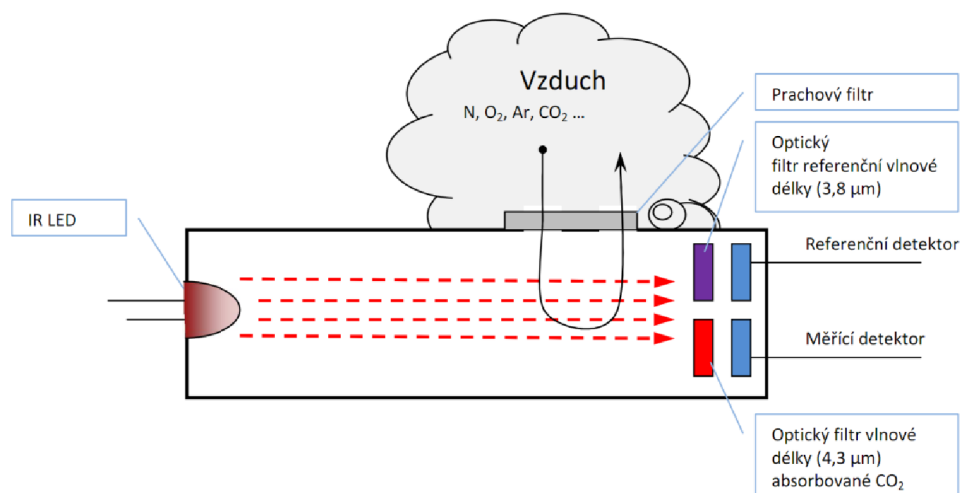
Polovodičové senzory nejsou použitelné v bezpečnostních průmyslových aplikacích. Nízká selektivita, nelineární průběh a časová nestabilita signálu směřují jeho použití především do indikačních aplikací, pro hlídání nastavených limitů a signalizaci jejich překročení, a to pouze v nízkých měřicích rozsazích.

1.4 Optické senzory CO₂

Senzor pracuje na základě absorpce části infračerveného spektra v molekulách CO₂. Měřítkem koncentrace je zeslabení intenzity infračerveného záření určité vlnové délky, které převádí detekční prvek na elektrický signál. Tento princip představuje nejlepší výsledky měření, vyznačuje se selektivitou, dlouhodobou stabilitou a dlouhou životností. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena. Podrobnější popis funkce toho typu senzoru jsou popsány v následující kapitole a kapitole 2.1.

1.4.1 Nedisperzní IR senzor

V senzoru je použita diferenční absorpční metoda, její schéma je vidět na (Obr. 3). NDIR senzor měří koncentraci cílového plynu za použití optických filtrů. Pro první filtr je zvolena vlnová délka, pro kterou má cílový plyn největší absorpční. Druhý (referenční) filtr má zvolenu takovou vlnovou délku, pro kterou má naopak cílový plyn co nejmenší absorpční. Zdroj IR světla musí vyzařovat obě vlnové délky, které jsou použity.

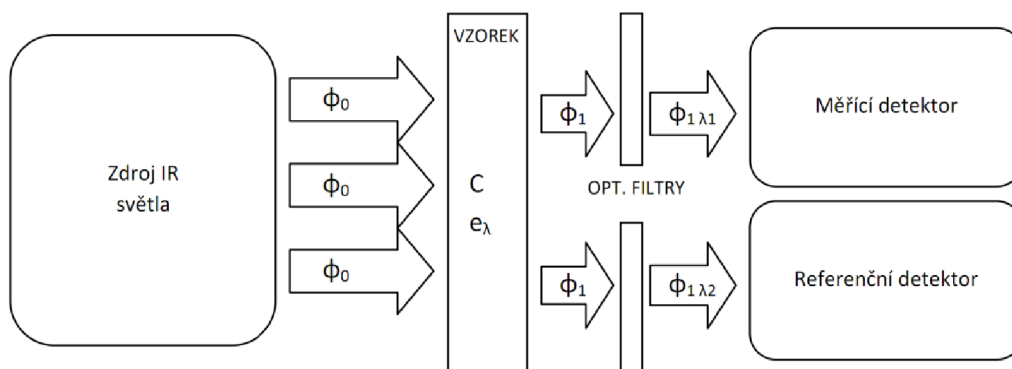


Obr. 3: Schéma NDIR senzoru

Tato modifikace spektroskopické absorpční metody zvyšuje odolnost vůči náhodným chybám a rušením přítomností jiných plynů nebo částic rozptylujících světlo.

1.4.2 Spektroskopická absorpční metoda

Spektroskopická absorpční metoda je vhodná pro zjišťování koncentrací v kapalných a plyných směsích. Využívá se závislosti koncentrace na absorbanci. Koncentrace je přímo úměrná absorbanci. Pro výpočet absorbance se uplatňuje Lambertův-Beerův zákon (1.1) o absorpci světla určité vlnové délky v neabsorbujícím prostředí. Metoda využívá kolimovaný paprsek světla daného světelného toku a spektrální charakteristiky procházející homogenním vzorkem dané tloušťky. Měřením je možné zjistit hodnotu intenzity osvětlení při vstupu do vzorku a intenzitu osvětlení vystupující ze vzorku. Výpočtem se získává hodnota absorbance, která je úměrná koncentraci. Vstupní intenzita se měří použitím prázdné kyvety (tzv. Blind), případně se kyveta plní vodou. Měřený vzorek se umísťuje do stejné kyvety nebo kyvety stejného typu. Výhodou spektroskopické absorpční metody je, že vzorek není ovlivňován. Nevýhodou je možné ovlivnění jinými částicemi, na kterých dochází k rozptylu světla (prachové částice). Toto je možné odstranit filtrem (v tomto případě prachovým) a kalibrací.



Obr. 4: Schéma měřicí aparatury diferenční spektroskopické metody [1]

$$A = e_{\lambda} \cdot C \cdot d = -\log\left(\frac{\Phi_1}{\Phi_0}\right) = -\log\left(\frac{E_1}{E_0}\right) \quad (1.1)$$

kde: A – Absorbance (-)

e_{λ} – molární absorpční koeficient ($\text{mol}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)

d – délka optické dráhy látkou (m)

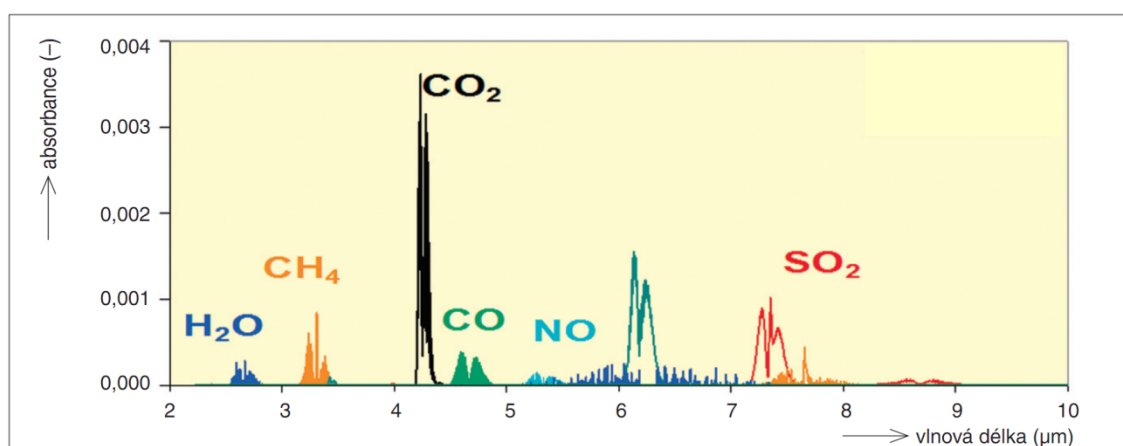
C – molární koncentrace ($\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$)

Φ_1 – Světelný tok vystupující ze vzorku (lm)

Φ_0 – Světelný tok vstupující do vzorku (lm)

E_1 – Světelný tok vystupující ze vzorku (lx)

E_0 – Světelný tok vstupující do vzorku (lx) [1]



Obr. 5: Spektrum absorpce infračerveného záření různými plyny [3]

1.5 Měření teploty

Pro měření teploty je možné použít mnoho typů senzorů. Každý princip je vhodný pro měření v daném prostředí a teplotním rozsahu. Základní rozdělení teplotních senzorů je na kontaktní a bezkontaktní. Vzhledem k zaměření práce budou dále popsány kontaktní elektrické senzory. Dilatační a speciální senzory vzhledem k tématu práce nebudou řešeny.

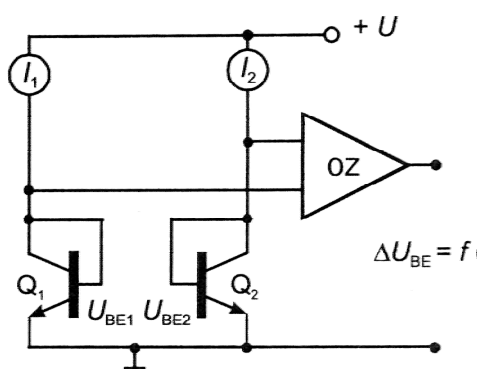
Tab. 2: Souhrnný přehled kontaktních senzorů teploty [3]

Vlastnost	Termočlánek	Odpor. kovové	Odpor. polovodičové	PN polovod.
Teplotní rozsah (°C)	-200 - +2300	-200- +850	-80 - +150	-55 - +150
Citlivost	--	-	+	++
Linearita	-	+	--	+
Záměnnost	+	++	--	+
Stárnutí	--	++	-	-
Pasivita	+	--	--	--
Rychlost	++	+	+	-
Odolnost	++	--	+	-

Vzhledem k předpokládanému použití v prostředí s teplotou v okolí pokojové teploty je teplotní rozsah integrovaného senzoru -55°C až $+150^{\circ}\text{C}$ naprosto dostačující. Integrované senzory zpravidla už obsahují obvody korekce, kalibrace a komunikace.

Teplota je měřena na PN přechodu báze-emitor bipolárního tranzistoru. Citlivost se pohybuje na intervalu $-2,5\text{mV/K}$ až 2mV/K . Zapojení je v režimu proudového zdroje řízeného teplotou.

Jak je vidět v zapojení (Obr. 6), senzor je tvořen dvěma tranzistory a rozdílovým zesilovačem. Používají se tranzistory teplotně citlivé. Jeden z dvojice tranzistorů má více emitorů nebo je zapojeno více tranzistorů paralelně. Toto zapojení je v literatuře označováno jako PTAT (Proportional To Absolute Temperature). Hodnoty proudů I_1 a I_2 musejí být rozdílné. [3], [4]



Obr. 6: Zjednodušené schéma integrovaného senzoru teploty [4]

$$\Delta U_{\text{BE}} = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (1.2)$$

kde: T – Teplota (K)

I_1 – emitorový proud tranzistorem Q_1 (A)

I_2 – emitorový proud tranzistorem Q_2 (A)

q – elementární náboj ($1,602 \cdot 10^{-19}$ eV)

k – boltzmanova konstanta ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$) [4]

Výstup rozdílového zesilovače je připojen na A/D převodník. Takto získaná hodnota je přímo úměrná termodynamické teplotě (K).

1.6 Oxid uhličitý

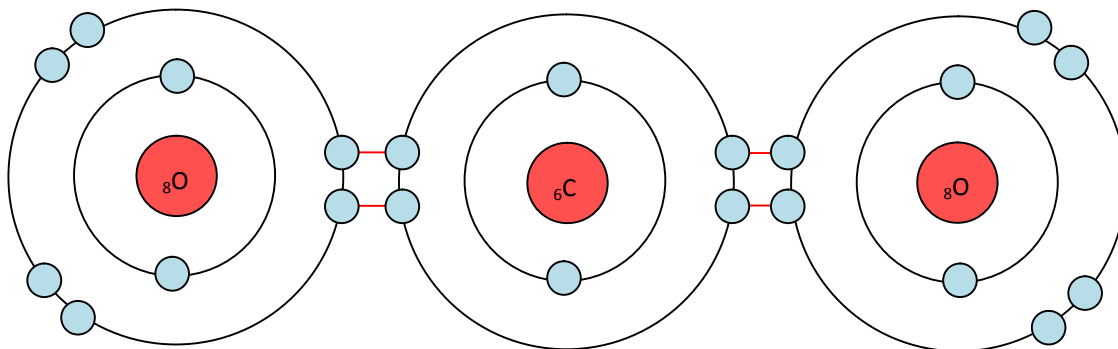
Oxid uhličitý je molekula, která se přirozeně vyskytuje v plynném skupenství v atmosféře. Vzniká dýcháním živých organismů, dokonalým spalováním uhlíku a kvasnými procesy. Oxid uhličitý je nutný pro proces fotosyntézy.

Oxid uhličitý je za pokojové teploty plynný, bezbarvý, rozpustný ve vodě a bez zápachu. Je cca 1,52 krát těžší než vzduch.

Molekula oxidu uhličitého je tvořena jedním atomem uhlíku (C) a dvěma atomy kyslíku (O). Atomy jsou spojeny dvojnou vazbou. Atomy svírají úhel 180° . Vzdálenost atomů je 116,3 pm.

Tab. 3: Vlastnosti oxidu uhličitého [5]

Registrační číslo	124-38-9
Molární hmotnost	44,0095 g·mol ⁻¹
Hustota	1,98 kg·m ⁻³ (plynný), 1560 kg·m ⁻³ (pevný)
Teplota tání	196,15 K (-78 °C)
Teplota varu	217,15 K (-57 °C) při 0,5 MPa
Kritická teplota	305 K (31 °C)
Kritický tlak	7,390 MPa
Rozpustnost ve vodě	1,45 kg·m ⁻³
Vzhled	bezbarvý, bez zápachu, bez chuti
Systematický vzorec	C = O = C



Obr. 7: Zjednodušený model molekuly oxidu uhličitého (CO₂) – sféry, valenční elektrony

1.7 Koncentrace CO₂ a lidský organismus

Historicky nebývaly koncentrace CO₂ v místnostech tak vysoké, jako jsou dnes. Dříve bylo používáno pro vytápění spalování dřeva. Později byla používána plynová, případně olejová topidla, která potřebovala také dostatečný přívod kyslíku ze vzduchu. S příchodem elektrických topidel a centrálního vytápění dochází z ekonomických důvodů k postupnému utěšňování místností.

V dnešní době už technologie (plastová okna apod.) dovolují vytvořit tak utěšněné prostředí, že se přirozené větrání snížilo dle [5] cca 40 krát. Přestože se už místnosti nevytápějí spalováním, některé zdroje CO₂ zůstávají. Tím největším je dýchání. Dalším velkým zdrojem CO₂ v místnostech je kouření tabákových výrobků.

Koncentrace oxidu uhličitýho ovlivňuje kvalitu ovzduší. Pro vnitřní prostory by měla být koncentrace CO₂ menší než 1000 ppm. Při překročení této koncentrace dochází ke snížení psychického výkonu, poruchám pozornosti a při výraznějším překročení dochází k bolestem hlavy, malátnosti apod. Při překročení koncentrace 5000 ppm existují závažná zdravotní rizika. V nařízení vlády 361/2007 Sb. je uvedena hodnota PEL pro CO₂ 5000 ppm. Maximální hodnota (NPK-P), se kterou se může člověk za směnu setkat je 25000 ppm.

Tab. 4: Vlastnosti koncentrace CO₂ [7]

Koncentrace CO ₂ (ppm)	Komentář
40000	Ztráta vědomí
25000	NPK-P
15000	Dýchací potíže
5000	PEL
2000 - 5000	Bolest hlavy, Únava
1500 - 2000	Poruchy soustředění
1000 - 1500	Vydychaný vzduch
800 - 1000	Doporučeno pro vnitřní prostředí
400 - 600	Vyvětraná místnost
300 - 450	Venkovní prostředí

Člověk potřebuje pro dýchání vzduch obsahující kyslík, potřebný pro metabolickou přeměnu látek. Člověk provádí v klidu průměrně 16 nádechů a výdechů za minutu, průměrný nádech v klidu má objem 0,5 l vzduchu. Objem plic je 5 – 6 l v závislosti na výšce, pohlaví a dalších dispozicích. V plicích sklípcích dochází k výměně kyslíku (O₂) za oxid uhličitý (CO₂) vázaný na hemoglobin v krvi do vzduchu v plicích. Obsah CO₂ ve venkovním vzduchu je cca 350 ppm (0,035%). Člověkem vydechovaný vzduch má koncentraci CO₂ 35000 – 50000 ppm (cca 3,5 - 5%). [5], [3], [6], [7]

Tab. 5: Spotřeba vzduchu v závislosti na činnosti [7], [5]

Činnost	Spotřeba vzduchu (l·min ⁻¹)
Klid	7 – 10
Chůze	15 – 20
Zrychlený pohyb	20 – 30
Středně těžká práce	30 – 40
Těžká práce	40 – 50
Extremní zátěž	50 – 120

Koncentrace CO₂ ve vydechovaném vzduchu je přímo úměrná tělesné zátěži. Z toho vyplývá minimální větrání v místnosti pro dodržení koncentrace 1000 ppm je 25 m³·hod⁻¹·osoba⁻¹.

Následující výpočet ověřuje hodnotu větrání při dodržení požadované koncentrace 1000 ppm. Dosazované hodnoty odpovídají hodnotám při klidném spánku jednoho člověka ve vyvětrané ložnici.

$$V_{CO_2} = V_{nádech} \cdot 3,5\% = 0,5 \cdot 0,035 = 17,5 \text{ ml} \quad (1.3)$$

$$VPPM = PN \cdot V_{CO_2} = 14 \cdot 17,5 = 245 \text{ ml/min} \quad (1.4)$$

$$VPPH = VPPM \cdot 60 = 245 \cdot 60 = 14,7 \text{ l/h} \quad (1.5)$$

$$V_{ppm} = \frac{1}{C_{pož} - C_{norm}} \cdot VPPH = \frac{1000000}{1000 - 400} \cdot 19,2 = 24,5 \text{ m}^3/\text{h} \quad (1.6)$$

kde: V_{CO_2} – Objem oxidu uhličitého v dechu (ml)

V_{NADECH} – Objem nádechu (l)

PN – Počet nádechů (-)

$VPPM$ – Objem oxidu uhličitého za minutu (ml/min)

$VPPH$ – Objem oxidu uhličitého za hodinu (l/h)

C_{norm} – Koncentrace CO₂ ve venkovním prostředí (zdroji čerstvého vzduchu) (ppm)

$C_{pož}$ – Koncentrace CO₂ požadovaná v místnosti (ppm)

V_{ppm} – Požadovaný objem vzduchu vyměněný za hodinu na jednu osobu (m³·hod⁻¹)

Výpočtem bylo ověřeno, že minimální hodnota větrání je dostačující, ale v případě změny činnosti je nutné zjistit (vypočítat) danou minimální hodnotu větrání. Pro školská zařízení je nutno vycházet z předepsaných hodnot uvedených v příloze 3 vyhlášky MŠMT č. 343/2009 Sb.

2 Použité senzory

2.1 Oxid uhličitý - Figaro CDM7160

Digitální senzorický modul je typu NDIR (Non-Dispersive Infra Red). Funguje na principu snížení intenzity určité vlnové délky infračerveného světla pohlceného molekulami CO₂ ve vzduchu. Přesněji se jedná o diferenční spektrální metodu, popsanou v kapitole 1.4.2. Princip NDIR senzoru je podrobněji popsán v kapitole 1.4.1. Vzduch přirozeně (difúzně), proudí do senzoru. Jako zdroj světla slouží IR LED. Selektivitu IR spektra zajišťuje filtr vlnové délky 4,3 μm před detektorem. Úbytek intenzity je zjišťován detektorem IR světla. Senzor FIGARO CDM7160 používá druhý detektor jako referenční, který detekuje pouze referenční vlnovou délku 3,8 μm. Koncentrace je vypočtena na základě rozdílů intenzit. Senzor je vybaven částicovým filtrem z netkané textilie. Tímto filtrem je omezen vliv rozptylu světla na částicích a znečištění prvků optického systému. [8]



Obr. 8: Senzor CDM7160

Tab. 6: Vlastnosti senzoru CDM7160

Rozsah měření	0 – 10000 ppm, (kalibrovaný) 300 – 5000 ppm
Přesnost měření	± (50 ppm + 3% ze čtené hodnoty) v rozsahu 300 – 5000 ppm CO ₂
Doba odezvy	120 s
Napájecí napětí	5 V ± 0,25 V
Spotřeba	10 mA, špičkově až 60 mA

Senzor CDM7160 je osazen 8bitovým mikrokontrolérem (PIC 16F1788), který provádí zpracování signálu a převod do digitální podoby. Dále je možné údaje vyčítat a zapisovat nastavení pomocí rozhraní UART nebo sběrnice I²C. Rozsah koncentrace senzoru je 0 – 10000 ppm CO₂, PWM výstup 0 – 5000 ppm nebo 0 – 2000 ppm CO₂.

2.1.1 Komunikace

Při použití komunikace přes sběrnici I²C podporuje senzor vysokorychlostní mód (až 400 kHz), ale ve výchozím stavu je použit standardní mód (až 100 kHz). Komunikace využívá CMOS logické úrovně, vztažené k napájecímu napětí senzoru.

Adresování senzoru je možné pomocí jedné ze dvou adres dle logické úrovně na pinu CAD0. Z toho vyplývá, že je na jedné I²C sběrnici možno použít maximálně dva senzory CDM7160.

I ² C ADRESA:	1	1	0	1	0	0	CAD0
--------------------------	---	---	---	---	---	---	------

Je možné zapisovat a číst data v registrech a paměti, které jsou k tomu určeny. Zápis je možný do registrů a paměti, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 7: Tabulka registrů a paměti CDM7160

Adresa	Název	Typ	Funkce	Popis (bity)
0x00	RST	REGISTR	Softwarový reset	0 - RESET
0x01	CTL	EEPROM	Operační mód	0-1bit CTL, 2 FMODE
0x02	ST1	REGISTR	Status registr	0 MSEL, 1 CAD0, 4 AVGFG, 6 ALARM, 7 BUSY
0x03	DAL	REGISTR	Koncentrace CO ₂ LO byte	0-7bit
0x04	DAH	REGISTR	Koncentrace CO ₂ HI byte	8-14bit
0x07	AVE	EEPROM	Počet průměrovaných hodnot	0-5bit
0x0C	ALHI	EEPROM	Horní limit koncentrace alarmu	0-7bit
0x0D	ALLO	EEPROM	Dolní limit koncentrace alarmu	0-7bit
0x0F	FUNC	EEPROM	Nastavení PWM výstupu	0 PWME, 3 PMWR

Senzor je možné nastavovat pomocí zápisu do paměti EEPROM. Naopak vyčtením obsahu registrů je možné získat stav senzoru. Podrobnější popis registrů s vysvětlením funkce jednotlivých bitů je popsán níže.

RST – adresa 0x00

bit 1	RESET	0: Normální stav 1: Reset Reset se provádí zápisem do registru. Pro provedení dojde k automatickému vynulování.
----------	--------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

CTL – adresa 0x01

bit 0-1	CTL	00: Měření zastaveno 01: - 10: Nepřerušované měření 11: -
bit 2	FMODE	0: Plovoucí průměrování 1: Digitální IIR filtr

STATUS – adresa 0x02 – pouze pro čtení

bit 0	MSEL	0: LO (dle stavu pinu MSEL) 1: HI (dle stavu pinu MSEL)
bit 1	CAD0	0: LO (dle stavu pinu CAD0) 1: HI (dle stavu pinu CAD0)
bit 4	AVGFG	0: Průměrování nedokončeno 1: Průměrování dokončeno
bit 6	ALARM	0: Koncentrace CO ₂ je nižší než 10·ALLO (0x0D) 1: Koncentrace CO ₂ je vyšší než 10·ALHI (0x0C) Stav je přenášen na fyzický pin ALARM
bit 7	BUSY	0: Data možno vyčíst 1: Zaneprázdněno

DAL – adresa 0x03

bit 0-7	DAL	Dolní Byte koncentrace
------------	------------	------------------------

DAH – adresa 0x04

bit 0-5	DAH	Horní Byte koncentrace
------------	------------	------------------------

AVERAGE – adresa 0x07

bit 0-5	AVGFC	Počet průměrovaných hodnot = AVGFC + 1 (AVGFC 0 – 63)
------------	--------------	----------------------------------------------------------

HIGH ALARM – adresa 0x0C

bit 0-7	ALHI	Horní limit koncentrace = ALHI·10 (ALHI 0 – 255)
------------	-------------	-----------------------------------------------------

LOW ALARM – adresa 0x0D

bit 0-7	ALLO	Dolní limit koncentrace = ALLO·10 (ALLO 0 – 255)
------------	-------------	-----------------------------------------------------

FUNCTION – adresa 0x0F

bit 0	PWME	0: PWM výstup zakázán 1: PWM výstup povolen
bit 3	PMWR	0: Výstup koncentrace v rozsahu 0 - 2000 ppm 1: Výstup koncentrace v rozsahu 0 - 5000 ppm

Měření koncentrace probíhá v intervalu 2 sekund. Samotné měření trvá 0,3 sekundy, po tuto dobu není možné vyčítat aktuální data. Po dobu měření je výstup BUSY ve stavu logické 1, této vlastnosti je možné využít pro startování vyčítání hodnot. Po připojení napájení je nutné vyčkat po dobu, než je dokončeno průměrování/filtrování. Tato doba odpovídá hodnotě v registru AVGFC·2 sekundy, ve výchozím nastavení tedy 20 sekund.

Tab. 8: Popis pinů CDM7160

Pin	Název	Popis
1	VDD	Napájecí napětí
2	GND	Společná zem
3	ALARM	Výstup alarmu
4	PWM	Výstup PWM
5	CAD0	Volba adresy
6	MSEL	Volba I ² C / UART
7	CAL	Kalibrační pin
8	BUSY	Výstup BUSY (Zaneprázdněno)
9	TX/SDA	UART TX / I ² C SDA
10	RX/SCL	UART RX / I ² C SCL
11	NC	Nezapojeno

2.1.2 Postup kalibrace

Senzor je kalibrován výrobcem, ale s časem může docházet ke zvyšování chyby měření. Kalibraci senzoru je možné provádět dvěma způsoby, vzhledem k 0 ppm nebo k 400 ppm.

Kalibrace se provádí připojením kontaktu CAL (pin 7) k logické 0. Podle doby trvání připojení ($t_{\text{Připojení}}$) proběhne jeden ze způsobů kalibrace. Předpokládá se, že se senzor po dobu kalibrace nachází v prostředí s předpokládanou koncentrací CO₂ 0 ppm nebo 400 ppm. Tímto způsobem je možné opravit chybu měření senzoru.

- $2 \text{ s} < t_{\text{Připojení}} < 11 \text{ s}$ - Kalibrace na 400 ppm
- $t_{\text{Připojení}} > 12 \text{ s}$ - Kalibrace na 0 ppm

2.1.3 Testování senzoru

Za účelem usnadnění testování senzoru CDM7160 byla vytvořena knihovna pro vývojový prostředek Arduino, která usnadňuje komunikaci prostřednictvím sběrnice I²C. K této knihovně byl vytvořen i vzorový program. Program je k dispozici v Příloze H.

2.2 Teplota, vlhkost, atmosférický tlak - Bosch BME280

Senzor BME280 je miniaturní kombinovaný integrovaný senzor s digitálním výstupem na sběrnici SPI a I²C. Je určený pro bateriově napájené zařízení.

Hodnoty veličin nejsou v přímo čitelném formátu, je nutné provést přepočet pomocí kompenzačních konstant. Senzor je vybaven kompenzačními hodnotami uloženými přímo s paměti senzoru.

Tab. 9: Tabulka registrů BME280

Adresa	Registr	Funkce
0x88	DIG_T1_REG	16 bitů, unsigned short
0x8A	DIG_T2_REG	16 bitů, signed short
0x8C	DIG_T3_REG	16 bitů, signed short
0x8E	DIG_P1_REG	16 bitů, unsigned short
0x90	DIG_P2_REG	16 bitů, signed short
0x92	DIG_P3_REG	16 bitů, signed short
0x94	DIG_P4_REG	16 bitů, signed short
0x96	DIG_P5_REG	16 bitů, signed short
0x98	DIG_P6_REG	16 bitů, signed short
0x9A	DIG_P7_REG	16 bitů, signed short
0x9C	DIG_P8_REG	16 bitů, signed short
0x9E	DIG_P9_REG	16 bitů, signed short
0xA1	DIG_H1_REG	8bitů, , unsigned
0xD0	ID	ID čipu – BME280 = 0x60 (BMP280 = 0x56, 0x58)
0xE0	RESET	Restart – zápis 0x6B
0xE1	DIG_H2_REG	16 bitů, signed short
0xE3	DIG_H3_REG	8 bitů, unsigned
0xE4	DIG_H4_REG	16 bitů, signed short
0xE5	DIG_H5_REG	16 bitů, signed short
0xE7	DIG_H6_REG	8 bitů, unsigned
0xF2	CTRL_HUM	Nastavení vzorkovací frekvence - vlhkost
0xF3	STATUS	Indikace převodu hodnot a kopírování dat
0xF4	CTRL_MEAS	Nastavení vzorkování a volba režimu (Sleep, Forced, Normal)
0xF5	CONFIG	Nastavení vzorkovací frekvence (teplota, atm. tlak), IIR filtru, SPI
0xF7	PRESS_MSB	8 bitů
0xF8	PRESS_LSB	8 bitů
0xF9	PRESS_XLSB	8 bitů
0xFA	TEMP_MSB	8 bitů
0xFB	TEMP_LSB	8 bitů
0xFC	TEMP_XLSB	8 bitů
0xFD	HUM_LSB	8 bitů
0xFE	HUM_MSB	8 bitů

16bitové registry jsou ve formátu little-endian. Pro kompenzační hodnoty (DIG) je uvedena v tabulce pouze adresa LSB, adresa MSB v tabulce uvedena není, protože je vždy na následující adrese v paměti.

Senzor může pracovat ve třech režimech:

- Sleep – Senzor neměří, ale je možné pracovat s registry
- Forced – Senzor provede pouze jedno měření a přejde do režimu Sleep
- Normal – Senzor měří dle nastavené vzorkovací frekvence

Měřené veličiny jsou přenášeny v nezpracovaném tvaru. Rozlišení měřených veličin je:

- Teplota - 16 – 20 bitů
- Atmosférický tlak - 16 – 20 bitů
- Relativní vlhkost - 16 bitů

2.3 Teplota - Microchip MCP9802

Senzor MCP9802 je digitální integrovaný senzor pracující jako převodník teploty na číslo. Senzor je vybaven sběrnici I²C. Senzor je konfigurovatelný zápisem přímo do registrů senzoru prostřednictvím sběrnice. Teplota je měřena v 9 až 12bitovém rozlišení pomocí Sigma-delta A/D převodníku. Adresu I²C je nutné zjistit pomocí potisku na IO a dekodovací tabulky v dokumentaci k senzoru.

Tab. 10: Tabulka registrů MCP9802

Adresa	Název	Typ	Funkce
0x00	TA	REGISTR	Teplota prostředí (16bit)
0x01	CNF	REGISTR	Konfigurační registr
0x02	THY	REGISTR	Nastavení teplotní hystereze
0x03	TSET	REGISTR	Teplotní limit

3 Popis technologie IQRF

3.1 IQRF OS

Systém IQRF je navržen tak, aby umožňoval použití RF bezdrátového připojení podle potřeb uživatele. Moduly transceiveru obsahují mikrokontrolér pro ovládání vysílače a pro provádění uživatelsky definovaných funkcí a periférii.

Patentovanou architekturu IQRF TR modulu tvoří dvě softwarové vrstvy:

- Základní funkce předem naprogramované výrobcem. Tyto funkce tvoří operační systém.
- Aplikační vrstva používá rutiny ze základní vrstvy pro přizpůsobení modulu pro uživatelskou aplikaci.

Není potřeba sestavovat funkce související s protokolem, ale pouze sestavit aplikaci. Tento přístup výrazně snižuje náklady na čas a vývoj. Operační systém nabízí předem připravené softwarové funkce pro všechny běžné požadavky uživatelů. Není tedy nutné vytvářet celý uživatelský program (pomocí instrukcí mikrokontroléru a příkazů v jazyce C. Uživatel pouze přidává uživatelskou část softwaru do operačního systému. Uživatelská aplikace tzv. "Běží pod operačním systémem", což znamená, že je volána z OS, používá OS a je pod kontrolou OS.

Funkce operačního systému nemusí být spuštěny postupně (další funkce není vyvolána, dokud není dokončena předchozí), ale některé operace lze spustit takzvaně "na pozadí" (funkce zajišťuje provedení požadovaných operací, které běží nezávisle a okamžitě vrátí řízení zpět do nadřazeného programu - pseudoparalelismus). Tímto způsobem lze provést více procesů "současně". Pak struktura programu spočívá v tom, že kromě provedení spuštění postupně "v popředí" může běžet několik úkolů v pozadí. IQRF OS umožňuje provozovat i velmi složité operace včetně úplného SPI komunikačního protokolu na pozadí.

IQRF OS podporuje komunikaci:

- RF (rádio) v topologiích typu peer-to-peer a IQMESH.
- Standardní sériový SPI (SLAVE režim) pro připojení k perifériím nebo k PC (např. přes CK-USB-04x).
- UART pro připojení k perifériím nebo k PC (např. přes CK-USB-04x).

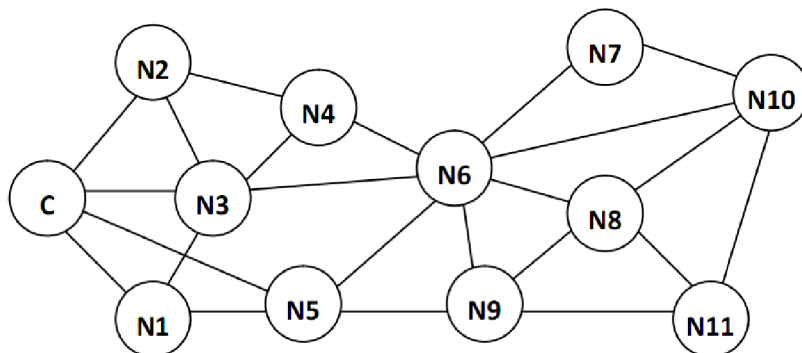
Další komunikace lze realizovat s uživatelským programem (I²C, UART, 1WIRE ...) využívající HW komunikační moduly uvnitř MCU. Komplexní standardní komunikační rozhraní (USB, Ethernet, GSM,...) nelze realizovat pomocí samostatného TR modulu.

Operační systém podporuje nízkou spotřebu (DC)TR modulů s funkcí spánku. V režimu spánku dochází k zastavení aplikace. Režimy řízení spotřeby RF optimalizují spotřebu pro příjem. Pro zvýšení spolehlivosti je použita funkce watchdog. [9]

3.2 IQMESH

Jedná se o topologii sítě, kdy každý prvek sítě může komunikovat s jiným prvkem. Prvky sítě jsou Uzly (Anglicky NODE, dále označeno jako N) a Koordinátor sítě (Anglicky COORDINATOR, dále označeno jako C). Není podmínkou, aby byly tyto prvky vzájemně v přímém dosahu. Pro komunikaci mezi prvky, které nejsou v přímém dosahu, jsou využity ostatní prvky sítě. Předávání paketů v síti

zajišťuje mechanismus adresování a mapování sítě IQMESH. Síť může být tvořena až 240 prvky. Každý prvek má přidělenou jednoznačnou adresu v síti a svou roli (N, C). Tyto vlastnosti zvyšují stabilitu, robustnost a flexibilitu sítě. Toto řešení je patentováno firmou Microrisc s.r.o.



Obr. 9: Topologie IQMESH sítě

3.3 DPA protokol

Protokol je nástavbou na operační systém IQRF (nyní verze 4.02), který je řešen v jazyce C. Současná verze DPA protokolu je 3.00, který je dodán ve formě pluginu. Jedná se o protokol pro přímý přístup k perifériím zařízení IQMESH. Při použití tohoto protokolu není nutné programovat obsluhu periférií, ale je to možné. Protokol DPA je Bytově orientován. Data jsou ve formátu little-endian. Sekvence je složena z dotazu (Request), potvrzení (Confirmation) a odpovědi (Response). Paket obsahuje parametry pro jednoznačné určení příjemce (odesílatele) a periferie.

V rámci IQMESH, kde je DPA protokol implementován, jsou přidělovány pro zařízení dvě role N a C. Pro vytvoření propojení je nutné jednotlivé prvky propojit, to se provádí pomocí svázání (bond) ke koordinátorovi sítě.

Je možné pracovat ve dvou RF režimech LP(Low Power) a STD (Standard power). Volba se provádí pomocí nahrání pluginu dle zvoleného RF režimu.

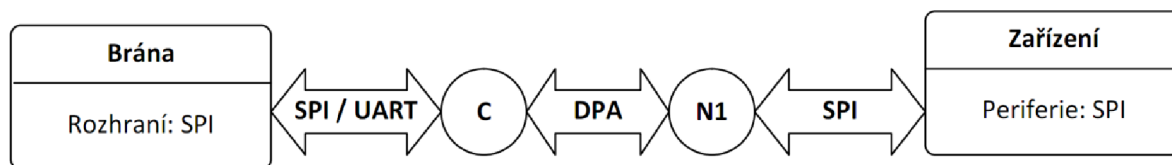
Periferie je obsluhována dle dat, která jsou přijata od koordinátora. Koordinátor se připojuje pomocí rozhraní SPI nebo UART.

Struktura zprávy DPA protokolu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	PDATA
--------------	--------------	------	------	---------------	---------------	------	-------

Popis funkcí jednotlivých bytů nebo skupin bytů:

- NADR - Adresa prvku sítě (C - 0, N - 1..239)
- PNUM - Identifikace periferie (např.: 0x20 - uživatelská, 0x0C - UART, ...)
- PCMD - Příkaz
- HWPID - Hardwarová identifikace
- ErrN - číslo chyby
- PDATA - Data zprávy



Obr. 10: Schéma DPA komunikace Koordinátor - Uzel

3.4 Custom DPA handler

Custom DPA handler je rozšiřující funkcionalita pro rozšíření funkcí OS a DPA protokolu. Takto vytvořená aplikace umožňuje částečně upravit strukturu datové zprávy dle potřeby. Hardwarová identifikace umožňuje rozlišit různé typy zařízení a usnadní tím zpracování zprávy. Použitím Custom DPA handler je možné přistupovat i k periferiím, které nejsou nativně podporovány v (DC)TR modulech. Podmínkou pro používání je povolení Custom DPA handler v hardwarové konfiguraci. Custom DPA handler pracuje na principu stavového automatu s následujícími stavy:

- Idle
- Reset
- Init
- ReceiveDpaRequest
- BeforeSendingDpaResponse
- Notification
- AfterRouting
- FrcValue
- FrcResponseTime
- BeforeSleep
- DisableInterrupts
- ReceiveDpaResponse
- IFaceReceive
- PeerToPeer
- AuthorizePreBonding
- UserDpaValue

3.5 IQRF (DC)TR Moduly

Moduly (DC)TR jsou základními prvky technologie IQRF, protože jsou realizací fyzické vrstvy přenosu dat v síti IQMESH. Jedná se o již několikátou generaci IQRF modulů, vyvíjených firmou Microrisc s.r.o. Pro ilustraci je uveden přehled řad, tak jak byly historicky vyvíjeny.

- TR-2x Zelená řada
- TR-5x Modrá řada
- TR-6x Fialová řada
- (DC)TR-7x Červená řada (Aktuální)

Tyto moduly se vyznačují především nízkou spotřebou energie a výborným dosahem (stovky metrů). Moduly jsou určeny pro obousměrný přenos „malých“ objemů dat v oblasti IoT.

Moduly jsou vyráběny v několika provedeních. Liší se zpravidla způsobem užití nebo montáže. Jsou k dispozici varianty pro montáž do SIM patice, povrchovou montáž na DPS nebo kolmou montáž na DPS a další. Je možné použít varianty s integrovanou anténou, U.FL konektorem nebo pájecí ploškou.

3.6 UP Board GW

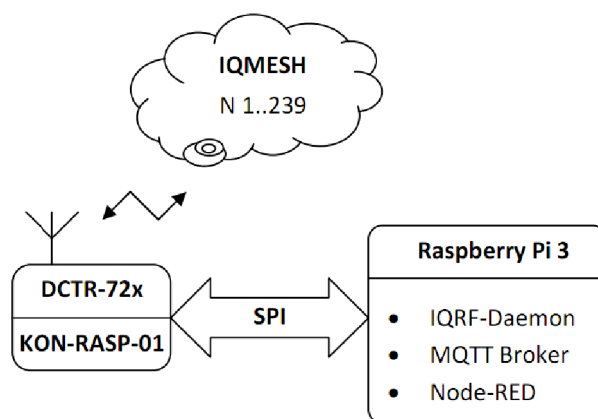
AAEON UP Board je jednodeskový počítač na platformě Intel Atom. Zde je použit 64bitový, čtyř-jádrový procesor s taktovací frekvencí 1,9 GHz. Rozhraní pro připojení je Pi HAT kompatibilní. Operační systém může být Windows 10 IoT nebo linuxová distribuce jako UbiLinux, Ubuntu nebo další. Data jsou ukládána do integrované paměti eMMC o velikosti 16/32/64 GB. Paměť RAM je ve velikostech 1/2/4 GB. Tento počítač je součástí oficiální sady „IoT – STARTER KIT“ od firmy Microrisc s.r.o.

Pro připojení (DC)TR modulu se používá přípravek KON-RASP-01, do kterého se pomocí SIM patice umístí modul (DC)TR-72. Tento přípravek se připojuje na GPIO konektor počítače UP Board. V tomto modulu musí být nahrán plugin pro obsluhu koordinátora IQMESH sítě.

3.7 Raspberry Pi GW

Raspberry Pi 3 je jednodeskový počítač na platformě ARM Cortex. V případě zde použitého Raspberry Pi 3 je osazen čtyř-jádrovým procesorem ARM Cortex-A53 s taktovací frekvencí 1,2 GHz. Pro ukládání dat je použita micro SDHC karta.

Pro připojení (DC)TR modulu se používá přípravek KONRASP-01, do kterého se pomocí SIM patice umístí modul (DC)TR-72. Tento přípravek se připojuje na GPIO konektor počítače Raspberry Pi. V tomto modulu musí být nahrán plugin pro obsluhu koordinátora IQMESH sítě.

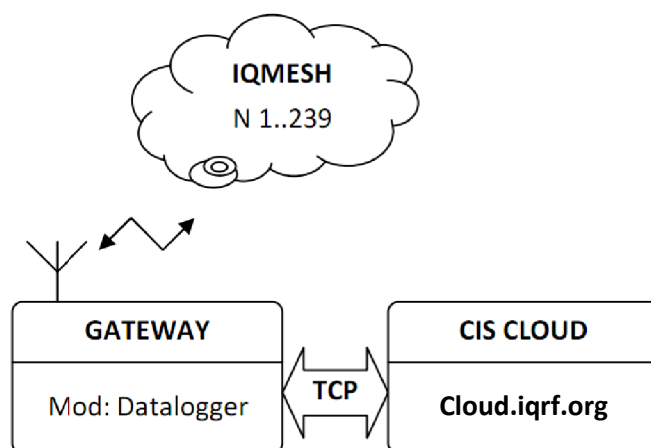


Obr. 11: Přenos dat při použití jednodeskového počítače

3.8 Brána - IQRF Ethernet gateway

Brána do sítě IQRF pro propojení s úložištěm (CIS cloud) s přenosem přes síť internet pomocí rozhraní ethernet. Brána je vybavena mikrokontrolerem, který zajišťuje přenos dat z (DC)TR modulu do sítě.

Brána pracuje ve dvou režimech – dataloger a gateway.

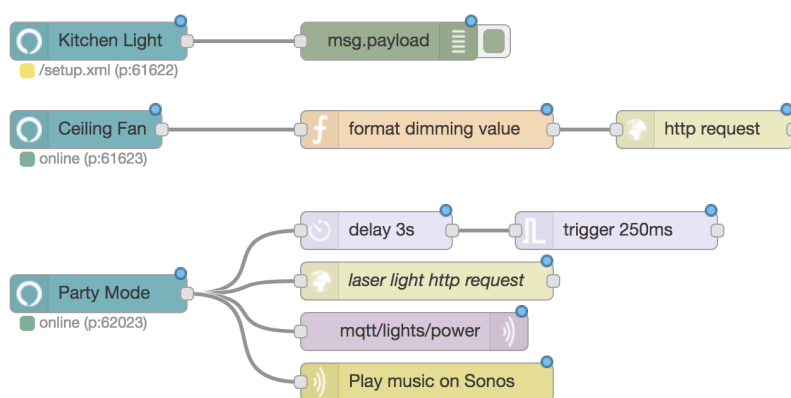


Obr. 12: Přenos dat prostřednictvím brány na úložiště (cloud)

4 Popis technologií pro zpracování a vizualizaci měřených dat

4.1 Node-RED

Jedná se o grafický programovací a vizualizační nástroj vyvinutý firmou IBM v roce 2013. Od roku 2016 patří Node-RED do portfolia komunity JS Foundation, která se zabývá jazykem JavaScript a vývojem open-source projektů. Hlavním důvodem ke vzniku bylo snadné propojení a vizualizace obsluhy MQTT pro IoT. Základním prvkem jsou „node“, které představují v podstatě objekty (ve smyslu OOP), vykonávající obsluhu periferií, protokolů a dalších funkcí. Programování se provádí přes webový prohlížeč (vzdáleně i lokálně). Zde jsou vytvářeny „flows“ a jejich provádění je paralelní. Je možné vytvářet vlastní kód pomocí node function, kde je možné zapsat program v jazyce Javascript. Je možné vytvářet vlastní prvky zabalením prvků do jediného prvku. Data se předávají mezi nody pomocí zpráv (msg.payload), zprávu je možné strukturovat.



Obr. 13: Ukázka kódu [Node-RED]

Je možné přidávat knihovny (Palety) pro různé účely, periferie a funkce. Pro přidávání knihoven pomocí Pallet manager je nutné mít nainstalován npm – správce balíčků jazyka JavaScript.

V prostředí Node-RED je také možné provádět vizualizaci dat. Pro toto slouží paleta node-red-dashboard, která obsahuje základní prvky pro vizualizaci dat. Obrazovka (dashboard) je dostupná na adrese <http://server-ip:1880/ui>. Prvky lze organizovat do záložek (Tabs), v těchto lze vytvářet skupiny (Groups) pro seskupování souvisejících prvků. Přiřazení do skupin se provádí přímo v nastavení prvku. Je možné vytvářet vlastní prvky jako uživatelské funkce.

Tento způsob vizualizace je vhodný spíše pro vizualizaci menšího množství dat. Velkou výhodou je vysoká rychlost vývoje softwaru.

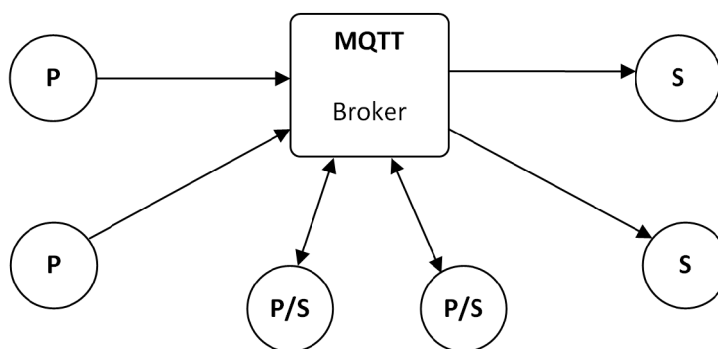
4.2 MOSQUITTO

MQTT je protokol pro předávání zpráv mezi zařízeními IoT(M2M) prostřednictvím centrálního uzlu. Server služby (MQTT Broker) pracuje nejčastěji na portu 1883, přes, který jsou předávána data od a do jiné služby v rámci sítě LAN nebo prostřednictvím internetu. Na tento server jsou připojeny prvky: písaři (publishers - **P**) a čtenáři (subscribers - **S**), obecně klienti. Tento server má funkci bufferu zpráv. Každá zpráva musí mít písařem přidělené téma (Topic), dle kterého si čtenář vyžádá od serveru zprávu. Toto téma může mít několik úrovní ve formátu (např.: `###/###/###`). Znakem „#“ je možné vybrat všechna témata v dané úrovni. Obecně může být prvek současně čtenář i písař. Jedná se o způsob

fronty zpráv. Jako transportní vrstvu je využíván protokol TCP. Obsah zprávy není standardizován, ale velikost zprávy je v nynější verzi protokolu omezena na 256 MB. Konfigurace umožňuje tři režimy QoS, tedy potvrzení doručení zprávy:

- 0 Zpráva doručena **bez** potvrzení přijetí
 - Příchozí zpráva přepíše předchozí, zprávy nemají unikátní identifikátor.
- 1 Zpráva doručena **alespoň** jednou
 - Příchozí zpráva je zařazena do fronty, každá zpráva má unikátní identifikátor
- 2 Zpráva doručena **právě** jednou
 - Příchozí zpráva je zařazena do fronty, každá zpráva má unikátní identifikátor

Každému přihlášenému klientovi je vytvořeno vlastní sezení (Session), v rámci kterého přistupuje ke zprávám. Každý přihlášený klient musí mít unikátní identifikátor v rámci sezení. Zpráva, která je v rámci daného sezení přečtena, již není znovu vyčítána. Příchozí zpráva vyvolá příznak, dle kterého je možné vyvolat callback funkci pro vyčtení zprávy.



Obr. 14: MQTT Broker - schéma

4.3 Grafana

Grafana je otevřenou platformou pro sledování a analýzu dat. Datovým zdrojem může být celá řada databázových systémů, například InfluxDB, MySQL, PostgreSQL a další. Databázové systémy slouží jako datové zdroje a z důvodu bezpečnosti je možné z nich pouze číst.

Systém umožňuje řízení uživatelských práv a přístupů k jednotlivým měřicím panelům. Uživatele je možné přiřazovat do organizací a přiřadit jim role v rámci dané organizace.

Role, které je možné přidělit uživatelům:

- Administrátor
- Editor
- Editor pouze pro čtení
- Pozorovatel

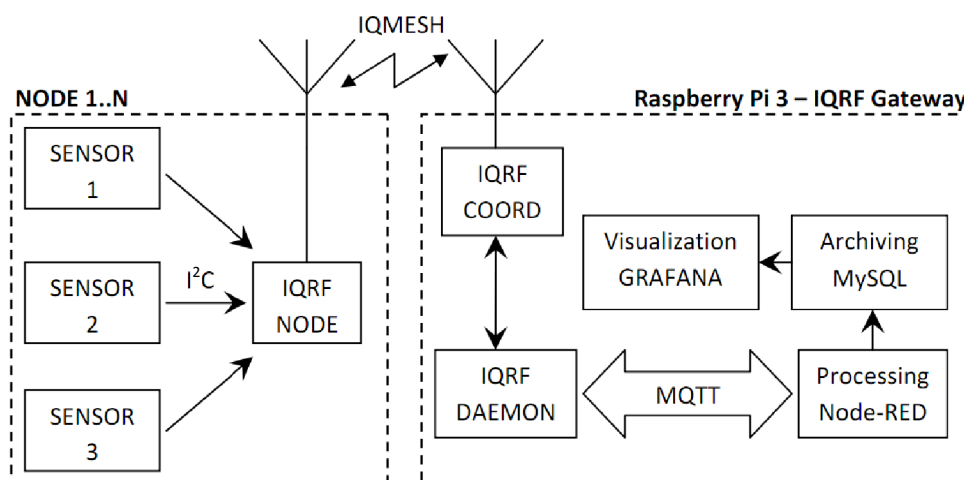
Uživatelský panel (Dashboard) je členěn do řádků (Row). Do řádků jsou umísťovány jednotlivé vizualizační prvky. Základem správného fungování prvku je vhodné sestavení SQL dotazu na databázi. Je vhodné v SQL dotazu specifikovat časový interval z důvodu výběru přesného množství dat z databáze a snížení množství přenášených dat.

5 Návrh měřicího systému

Měřicí systém je tvořen prvky, které jsou přizpůsobeny této aplikaci. Navržený měřicí systém se skládá z měřicích uzlů a centrální jednotky - hybridní měřicí systém. Měřené veličiny jsou koncentrace CO₂, teplota, relativní vlhkost a atmosférický tlak. Použité senzory mají digitální výstup s komunikací prostřednictvím I²C sběrnice. Senzory jsou připojeny k IQRF modulu (IQRF NODE) pomocí I²C sběrnice:

- Sensor 1 – Senzor CO₂ - Figaro CDM7160
- Sensor 2 – Senzor teploty, vlhkosti, atm. tlaku - Bosch BME280
- Sensor 3 – Senzor teploty – Microchip MCP9802

Přenos dat je prostřednictvím IQMESH sítě postavené na IQRF modulech. IQRF modul koordinátora sítě (IQRF COORD) je připojen k Raspberry Pi prostřednictvím SPI sběrnice. Komunikaci s koordinátorem sítě zajišťuje aplikace IQRF-Daemon. Předávání dat mezi IQRF-Daemon a Node-RED je prostřednictvím MQTT. V aplikaci vytvořené v Node-RED jsou naměřená data převedena do čitelné podoby a uložena do MySQL databáze. Pro vizualizaci je použit systém Grafana.



Obr. 15: Měřicí řetězec

Na základě navrženého měřicího řetězce byly sestaveny požadavky na měřicí přístroj. Na základě těchto požadavků byl navržen měřicí přístroj RMCD, viz následující kapitola.

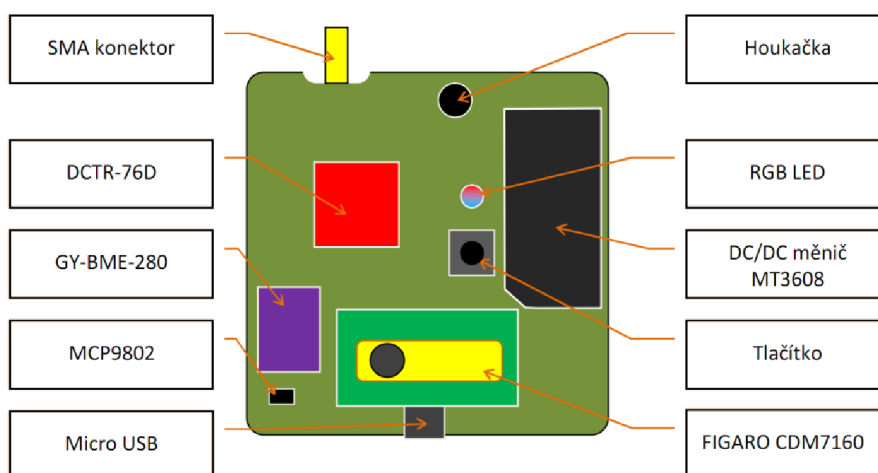
6 Návrh měřicího přístroje

Na základě návrhu měřicího řetězce a požadavků na měřené veličiny byl navržen měřicí přístroj RMCD (*Room Measurement of Carbon Dioxide*). Specifikace byla sestavena na základě těchto podkladů a požadavků.

6.1 Specifikace

Navržený měřicí přístroj je určen pro monitorování kvality ovzduší v místnostech, převážně v učebnách a laboratořích Katedry kybernetiky a biomedicínského inženýrství, VŠB - TU Ostrava. Je ho však možné použít i v jiných školských zařízeních, kancelářích nebo domácnostech. Naměřené hodnoty jsou přenášeny pomocí technologie IQRF. Aktuální koncentrace CO₂ je možné signalizovat pomocí RGB LED na přední straně přístroje. Díky modulárnímu řešení jsou možné volit různé varianty dle aktuální potřeby:

- Senzor CO₂ – Figaro CDM7160
- Senzor Teploty, vlhkosti, atm. tlaku – Bosch BME280
- Senzor Teploty – Microchip MCP9802
- Baterie 3,7 V (1050 mAh)
- Krabička KM-84
- Signalizace pomocí RGB LED + zvuková signalizace
- Tlačítka BOND, RESET a Uživatelské
- DPS 64 × 64 mm
- IQRF TR-76D
- Zařízení třídy III – SELV



Obr. 16: Fyzické schéma měřicího přístroje RMCD

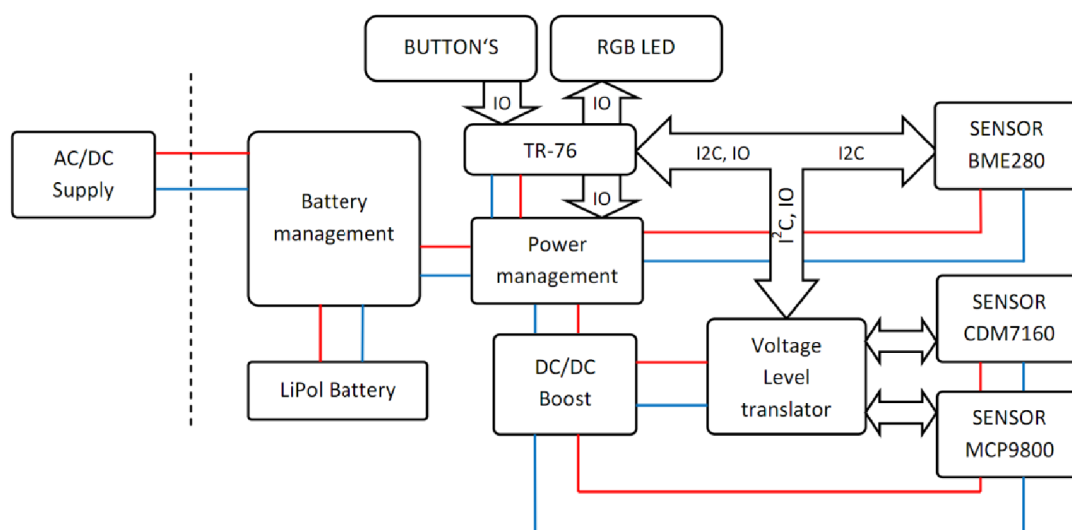
6.1.1 Varianty

Podle potřeby je možné upravit množství měřených veličin. Ve většině případů se počítá s využitím plné verze. V případě potřeby je možné vybrat variantu podle aktuálního požadavku na měření. Volba se provádí zápisem konstanty do EEPROM, informace o variantě je uložena v HWPID jako součást DPA paketu. Možné varianty jsou:

- Plná verze
- Pouze CO₂
- Pouze teplota
- Pouze teplota, vlhkost a atmosférický tlak
- Opakovač signálu – Router (bez měření)

6.2 Návrh RMCD

Návrh byl proveden s ohledem na dostupné komponenty včetně přihlédnutí k ekonomickému a praktickému hledisku výroby. Vybavení navrženého přístroje bylo optimalizováno s ohledem na univerzálnost použití při měření kvality ovzduší v místnostech. Zároveň však bylo navrhováno i z pohledu omezení spotřeby elektrické energie. Kompletní schéma zapojení je uvedeno v Příloze A.

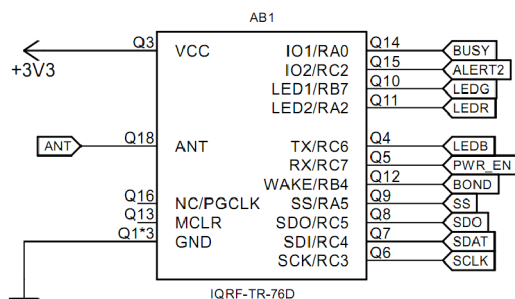


Obr. 17: Topologické schéma měřicího přístroje RMCD

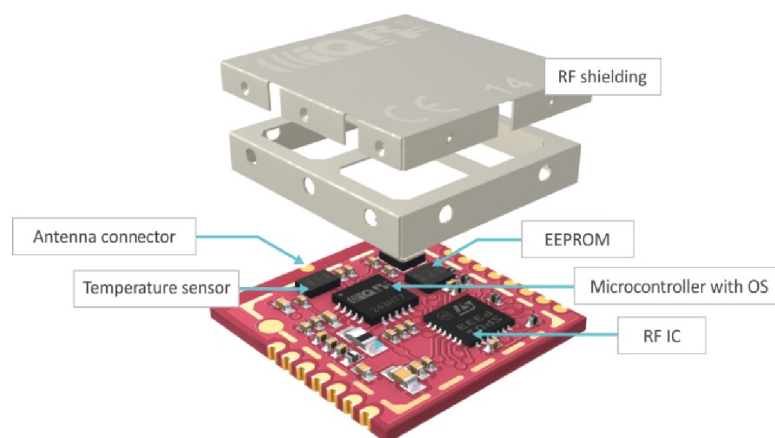
6.2.1 Komunikace s okolím

6.2.1.1 Modul (DC)TR-76

Modul (AB1) je vybaven mikrokontrolérem PIC 16LF1938 s 16 kB paměti FLASH a 1 kB paměti RAM a 256 B EEPROM. RF část modulu tvoří obvod SPIRIT1, ve kterém je implementována GFSK modulace. Výstup je vybaven symetrizačním členem BALF-SPI-01D3. Pro rozšíření velikosti paměti typu EEPROM je osazen obvodem 24AA256. Napájecí napětí je možné v rozsahu 3,1 V až 3,4 V, neobsahuje interní LDO stabilizátor jako některé jiné moduly (např. (DC)TR-72).



Obr. 18: Schéma zapojení (DC)TR-76 do obvodu



Obr. 19: (DC)TR-76 – rozloženo [10]

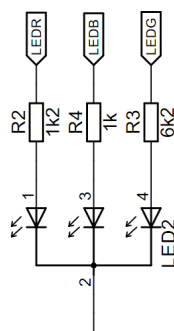
6.2.1.2 Anténa

Pro zvýšení dosahu je použita externí anténa. Anténa je naladěna na frekvenci 868 MHz s impedancí 50 Ω. Jedná se o typ antény $\lambda/4$. Pro připojení je použito koaxiálního SMA konektoru pro montáž na hranu DPS. Anténa je připojena pomocí konektoru XC4, signál je přiveden z portu Q18.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299\,792\,458}{868 \cdot 10^6} = 0,345 \text{ m} \quad (6.1)$$

6.2.1.3 Signalizace RGB LED

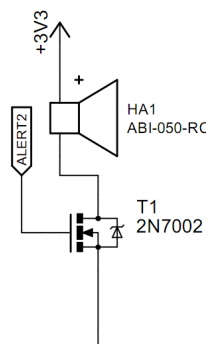
Pro signalizaci stavu zařízení byla využita RGB LED se společnou katodou. Pro rovnoměrnější jas RGB LED byly použity různé hodnoty předřadných rezistorů pro jednotlivé barvy. Rovnoměrné rozložení barev nelze dosáhnout z důvodu konstrukce a tvaru RGB LED. Výsledný vjem však může být velice subjektivní.



Obr. 20: Zapojení RGB LED

6.2.1.4 Zvuková signalizace

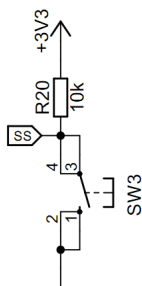
Akustická signalizace je použita pro případ nutnosti použít důrazné upozornění uživatele. Je použita piezoelektrická siréna $\geq 75\text{dB}$. Spínání je pomocí tranzistoru T1 připojeného na port Q15.



Obr. 21: Schéma zapojení piezo sirény

6.2.1.5 Uživatelské tlačítko

Tlačítko je určeno pro jednoduchou interakci s uživatelem. Připojení tlačítka na port Q9, který je zároveň použit jako „Slave Select“ pro SPI komunikaci, vyžaduje, aby při používání SPI (zápis programu) nebylo tlačítko stisknuto. Protože použitý port nedisponuje integrovaným pull-up rezistorem, je nutné použít externí rezistor R20.



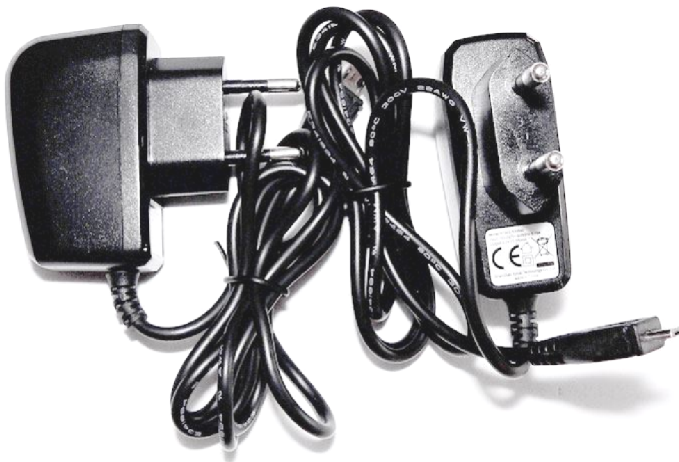
Obr. 22: Schéma zapojení uživatelského tlačítka

6.2.2 Napájení

6.2.2.1 Napájecí zdroj

Přístroj je napájen externím spínaným zdrojem. Předpokládá se nasazení v místě s možností trvalého napájení z elektrické sítě. Zdroj je zařízení třídy II a je možné ho použít pro napájení zařízení SELV.

Zdroj je vybaven pevně připojeným izolovaným vodičem zakončeným micro USB koncovkou. Tím je zaručena nezáměnnost koncovek. Výstupní napětí je 5 V. Maximální výstupní proud je 550 mA. Pro případ výpadku napájení je možné dočasně napájet přístroj z interní baterie.



Obr. 23: Napájecí zdroj 5 V

6.2.2.2 Nabíjení

Přístroj je vybaven interní Lithium - Polymerovou baterií s kapacitou 1050 mAh a napětím 3,7 V. Nabíjení baterie je řízeno obvodem NL1 (MCP73831). Volba nabíjecího proudu se provádí rezistorem R6, kdy jeho velikost je dána vztahem (6.3). Maximální nabíjecí proud LiPol baterie se obvykle stanovuje dle (6.2) [10].

$$I_{\max} = \frac{C_B}{t} = \frac{1050 \cdot \text{mAh}}{h} = 1050 \text{ mA} \quad (6.2)$$

kde: I_{\max} - maximální nabíjecí proud (mA)

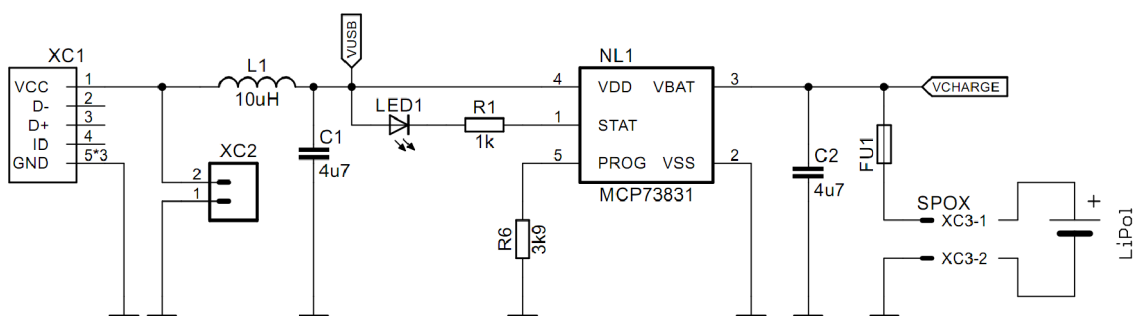
C_B - kapacita baterie (mAh)

Pro tento účel byl zvolen nabíjecí proud 260 mA, tedy cca 25% maximálního nabíjecího proudu. Zapojení je doplněno o signalizaci nabíjení pomocí LED1. Rezistor je volen nejbližší v řadě E24.

$$R_{\text{nastav.}} = \frac{1000 \cdot V}{I_{\text{nabíjecí}}} = \frac{1000}{0.26} \approx 3,9 \text{ k}\Omega \quad (6.3)$$

kde: $R_{\text{nastav.}}$ - Rezistor nastavující nabíjecí proud (Ω)

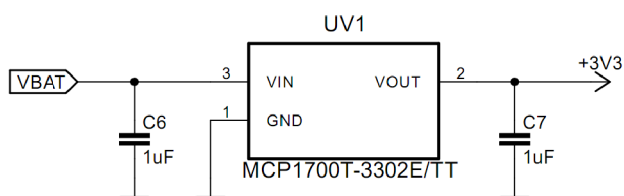
$I_{\text{nabíjecí}}$ - Nabíjecí proud (A)



Obr. 24: Schéma nabíjecího obvodu

6.2.2.3 Napájení z baterie

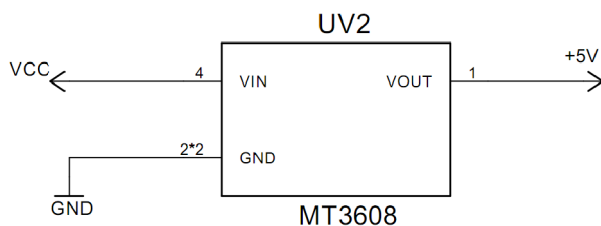
Při napájení z baterie je zapotřebí, aby obvod popsaný v kapitole 6.2.4.2 připojil baterii. Dále je nutné propojit XT1 nebo XT2 pro připojení baterie. V tom případě je napětí baterie upraveno LDO stabilizátorem UV1 (MCP1700) na 3,3 V a v případě sepnutí napájení senzorů pomocí obvodu popsaného v kapitole 6.2.2.4, dochází k úpravě měničem UV2 (MT3608) na 5 V.



Obr. 25: LDO stabilizátor 3,3 V

6.2.2.4 Napájení senzorů

Pro napájení senzorů B1(CDM7160) a BT1(MCP9802) bylo navrženo použití hotového modulu spínaného DC/DC měniče UV2. Pomocí trimru se provede nastavení výstupního napětí měniče na 5 V. Vstup měniče je připojen na napětí VCC. Modul je na DPS připojen pomocí pinových konektorů.



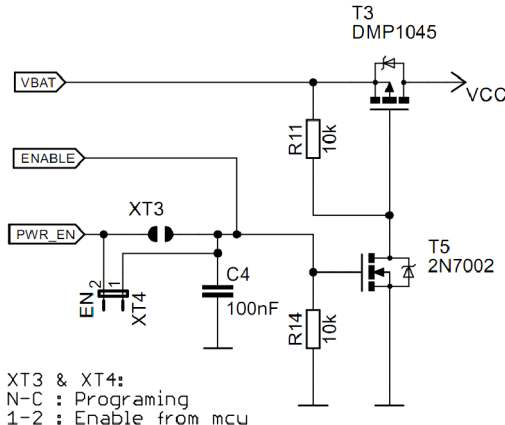
Obr. 26: Schéma připojení modulu MT3608 k RMCD

Pro napájení senzoru připojeného na konektor XC6 je použito napětí 3,3 V. Napětí 3,3 V je získáváno pomocí LDO stabilizátoru UV1 z napětí baterie.

6.2.2.5 Napájení senzorů - ovládání

Z důvodu omezení spotřeby, hlavně při provozu na baterii je možné odpojit napájení senzorů B1 a BT1. Tato funkce je ovládána pomocí IO portu Q5 na (DC)TR-76. Je nutné propojení XT3. Při

DD1. Napájení senzoru připojeného přes konektor XC6 není ovládáno.



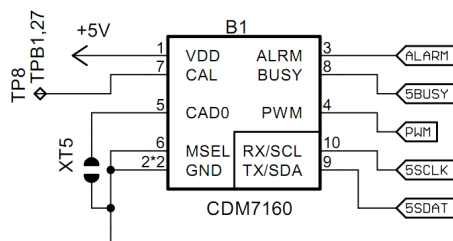
Obr. 27: Schéma zapojení obvodu ovládání napájení senzorů

6.2.3 Senzory

Podrobnější popis senzorů je v kapitole 2, která se zabývá senzory samotnými. V následujících kapitolách je popsán způsob připojení v rámci obvodu.

6.2.3.1 Figaro CDM7160

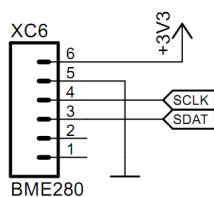
Senzor B1 je připojen na pomocí sběrnice I²C s CMOS logickými úrovněmi (5V). Montáž je provedena pomocí řadových konektorů. Volba adresy na sběrnici se provádí pomocí propojky XT4. Kalibrace senzoru je možná, přivedením logické 0 na testovací bod TP8.



Obr. 28: Schéma zapojení senzoru CDM7160 - CO₂

6.2.3.2 Bosch BME280

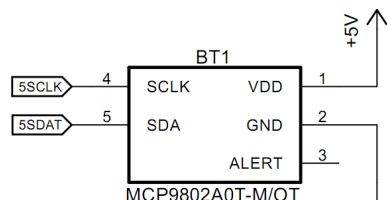
Senzor je připojen pomocí řadového konektoru XC6. Napájení je napětím 3,3 V, které není odpojováno. Je připojen pomocí sběrnice I²C přímo k modulu (DC)TR-76.



Obr. 29: Schéma zapojení konektoru pro BME280

6.2.3.3 Microchip MCP9802

Senzor je napájen napětím 5 V, které je odpojováno. Je připojen pomocí sběrnice I²C přes převodník DD1. Jedná se volitelný senzor, protože měří teplotu duplicitně. Ve většině konfigurací pravděpodobně nebude osazen.



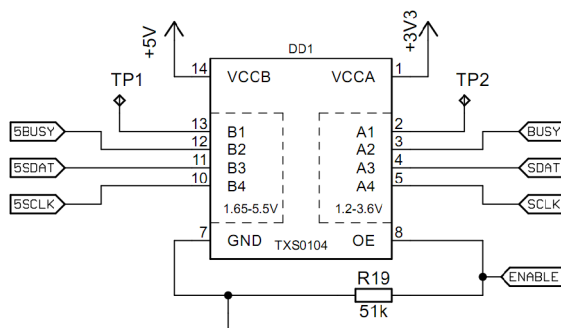
Obr. 30: Schéma zapojení senzoru MCP9802 - Teplota

6.2.4 Podpůrné obvody

6.2.4.1 Úprava logických úrovní

Použité senzory B1 a BT1 (není podmínkou) pracují s rozdílnými logickými úrovněmi než modul (DC)TR-76, proto je nutné použít převodník logických úrovní. Protože se jedná o úpravu signálů na sběrnici I²C, je použit převodník typu open-drain. Převod probíhá mezi napětím logických úrovní 3,3 V a 5 V. Převodník je vybaven integrovanými pull-up rezistory 10k Ω .

Použitý převodník úrovní TXS0140 od firmy Texas Instruments upravuje až čtyři kanály. V tomto případě jsou použity tři. Zbylý kanál je ponechán volný pro testování pomocí TP1 a TP2. Zapojení vyžaduje připojení obou retenčních napětí obou úrovní, které jsou použity. Převodník je možno rozpojit přivedením logické 0 na vstup OE (output enable).



Obr. 31: Zapojení převodníku TXS0104

6.2.4.2 Hlídní napětí baterie

Z důvodu ochrany baterie před úplným vybitím je použit obvod, který kontroluje velikost napětí na baterii. V případě poklesu pod nastavenou mez dochází k odpojení baterie. V tomto případě je možné pouze nabíjení baterie.

Zapojení je tvořeno operačním zesilovačem NL2 ve funkci komparátoru. Napětíovou referencí NL3 a napětíovým děličem R7–R8. Napětí baterie, při kterém dojde k jejímu odpojení, je dáno napětíovým děličem dle (6.4).

$$\frac{R_8 \cdot U_{bat}}{R_7 + R_8} < U_{ref} = \frac{15000 \cdot \Omega \cdot U_{bat}}{(3900 + 15000) \cdot \Omega} < 2,5 \text{ V} \quad (6.4)$$

Po úpravě dostáváme vztah pro výpočet napětí baterie, při kterém dochází k odpojení baterie.

$$\frac{(R_8 + R_7) \cdot U_{ref}}{R_8} > U_{bat} = \frac{(3900 + 15000)\Omega \cdot 2,5 \text{ V}}{15000 \Omega} > U_{bat} = 3,15 \text{ V} > U_{bat} \quad (6.5)$$

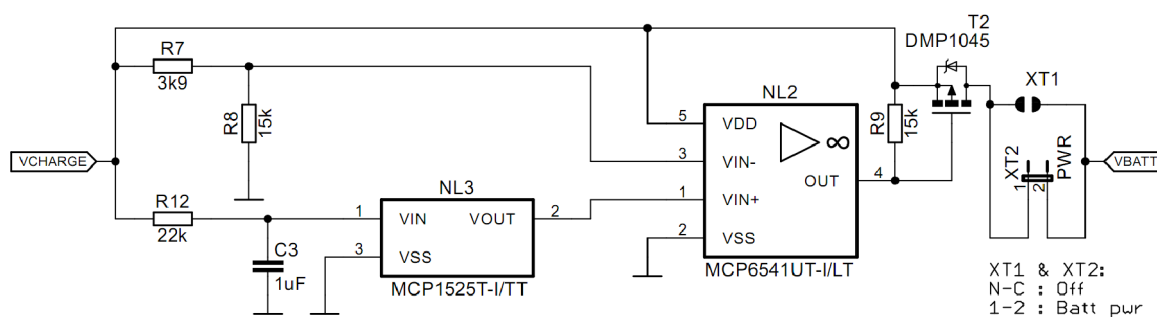
kde: R_7 - Hodnota rezistoru R7 (Ω)

R_8 - Hodnota rezistoru R8 (Ω)

U_{ref} - Referenční napětí (V)

U_{bat} - Napětí baterie (V)

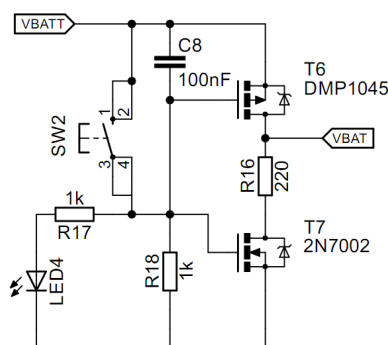
Když dojde ke splnění podmínek dle vztahu (6.5), dochází k překlopení komparátoru NL2. Na výstupu komparátoru se objevuje napětí baterie a je uzavřen tranzistor T2.



Obr. 32: Schéma obvodu hlídání napětí baterie

6.2.4.3 Obvod HW resetu

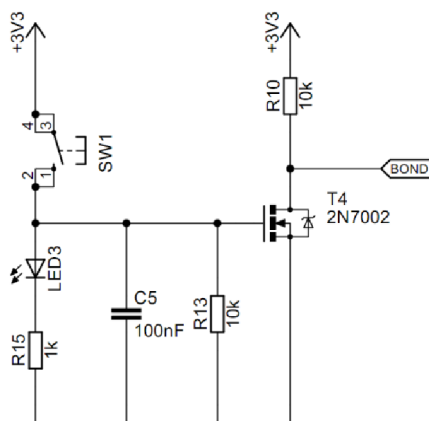
Pro případ nutnosti opětovné inicializace přístroje je použit obvod pro RESET. Rovněž je používán v případě Bond/Unbond procesu. Stiskem tlačítka dojde k přepnutí tranzistorů T6 a T7. Tranzistor T6 je normálně otevřen a T7 je normálně uzavřen. Rezistor R16 tvoří zátěž pro vybíjení kondenzátorů. Signalizace je řešena pomocí LED4.



Obr. 33: Schéma obvodu pro reset

6.2.4.4 Obvod BOND

Inicializace procesu registrace do sítě je zajištěno připojením logické 0 na port Q12. Za účelem omezení zákmitů tlačítka je použit pro připojení tranzistor T4 s pull-down rezistorem a kondenzátorem. Pro signalizaci je použita LED3 umístěná vedle tlačítka SW1.



Obr. 34: Schéma obvodu BOND

6.2.5 Deska plošných spojů

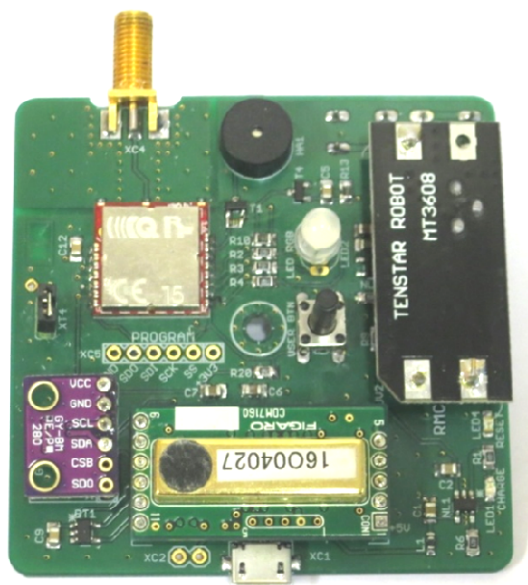
Pro tento účel navržená deska plošných spojů je přizpůsobena pro vestavbu do krabičky KM-84. Rozměry DPS jsou 64×64 mm se zaoblenými rohy a výřezem pro montáž anténního SMA konektoru (XC4). Část pro montáž anténního konektoru je ohraničena izolační mezerou ve společné zemi GND za účelem omezení rušení. Uprostřed je otvor (3,2 mm) pro uchycení v krabičce pomocí šroubu. Navržená DPS je dvouvrstvá s nepájivou maskou a servisním potiskem. Materiál DPS je FR4 (G11), pájecí plošky jsou galvanicky pozlacené. Většina pasivních součástek je volena v pouzdru velikosti 0805.

6.2.6 Postup osazování

Pro osazování je vhodné používat mikropáječku, v lepším případě horkovzdušnou pájecí stanici nebo pájecí pec. Nejprve byly osazovány součástky ze strany TOP, až byly osazeny všechny SMD součástky na této straně, pokračuje se stranou BOTTOM. Seznam použitých součástek je uveden v Příloze J. Osazuje se dle následujícího osazovacího postupu.

Osazovací postup:

1. Integrované obvody a tranzistory
2. Pasivní SMD prvky (rezistory, kondenzátory) a LED
3. Konektory a testovací body



Obr. 35: Fotografie elektroniky přístroje RMCD (Pohled shora)



Obr. 36: Fotografie prototypu RMCD

6.2.6.1 Úprava do krabičky

Protože je použita univerzální krabička KM-84, je nutné provést úpravy pro vestavbu elektroniky.

Hlavními úkony jsou:

- Odstranění sloupku na zadní straně krabičky
- Vrtání otvorů pro LED a tlačítko
- Vrtání otvoru pro SMA konektor
- Vrtání/Frézování otvoru pro micro USB
- Frézování přepážky na zadní straně
- Vlepení distanční podložky

6.2.6.2 Montáž

Montáž je možná, jak ve svislé, tak vodorovné poloze při dodržení podmínek měření a nastavení antény do svislé polohy. Doporučení pro samotnou montáž jsou uvedeny v kapitole 10.1.

6.2.7 Testování (testovací body)

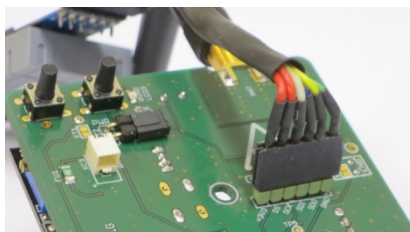
Pro kontrolu funkčnosti jsou určeny testovací body umístěné na straně BOTTOM. Pomocí testovací sondy je možné provádět měření na testovacích bodech. Měřená napětí je nutné vztáhnout k hladině GND.

Tab. 11: Tabulka testovacích bodů RMCD

TP1	Level translator HIGH
TP2	Level translator LOW
TP3	GND
TP4	V _{CHARGE}
TP5	+3,3 V
TP6	+5V
TP7	PWM
TP8	CAL

6.2.8 Zápis programu

Zápis programu do (DC)TR modulu se provádí pomocí programovacího přípravku CK-USB-04. Z důvodu inicializace programovacího režimu je nutné nejprve rozpojit propojky XT1 a XT3, případně odpojit baterii. Před a během programování je potřeba zajistit, aby nebylo stisknuto uživatelské tlačítko. Programovat lze i bezdrátově. Pro správné fungování je nutné sjednotit verzi OS ve všech (DC)TR modulech, tímto případně na verzi OS 4.02 (8/2017) v síti.



Obr. 37: Připojení pro programování pomocí CK-USB

6.3 Ovládání

K ovládání je přístroj vybaven několika ovládacími prvky, kdy pro každý se předpokládá určitá role uživatele.

Při používání přístroje se předpokládají následující role uživatelů:

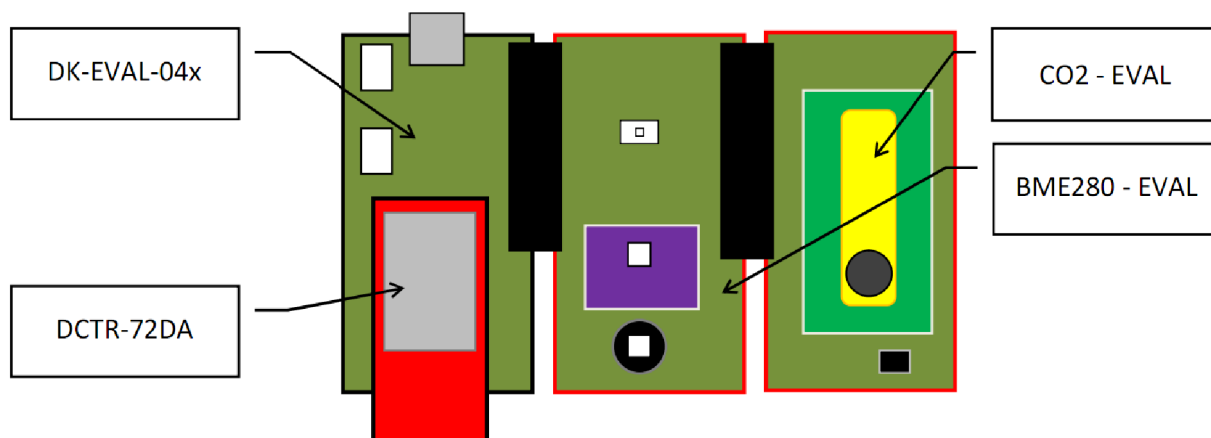
- Zákazník
 - Indikativní odečítání hodnoty CO₂ pomocí RGB LED (i za použití tlačítka)
 - Připojení zdroje
- Administrátor
 - Bond/Unbond
 - Reset
 - Konfigurace použití RGB LED (Svítil/Nesvítil, Bliknutí při vyčtení)
 - Připojení/Odpojení baterie
- Vývojář
 - Zápis programu
 - Aktualizace OS

Vlastnosti se dědí vždy od předchozí role.

7 Návrh výukových modulů pro měření environmentálních veličin

Součástí této diplomové práce je také návrh a realizace výukových modulů pro podporu výuky měření environmentálních veličin a IoT. Tyto moduly jsou určeny pro doplnění vývojových sad IQRF IoT-Starter-kit. Moduly jsou navrženy pro přímé připojení k DK-EVAL-04x, zapojení konektorů je kompatibilní. Moduly jsou odvozené od měřicího přístroje popsaného v kapitole 5.

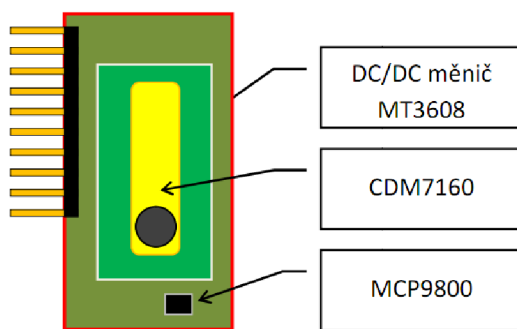
Výukové moduly jsou CO₂-EVAL a BME280-EVAL.



Obr. 38: Fyzické schéma DDC

7.1 Modul CO₂-EVAL

Navržený výukový modul slouží jako výukový a demonstrační přípravek pro podporu výuky v oblasti návrhu a realizace měřicích systémů pro měření environmentálních veličin a IoT. Modul je koncipován jako koncový. Výukový modul je vybaven senzorem koncentrace CO₂ CDM7160 od společnosti Figaro. Daný senzor je kalibrován výrobcem a je typu NDIR. Měřená koncentrace CO₂ je v jednotkách ppm. Další měřenou veličinou je teplota, která je měřena senzorem MCP9802 od firmy Microchip. Kompletní schéma je uvedeno v Příloze B.

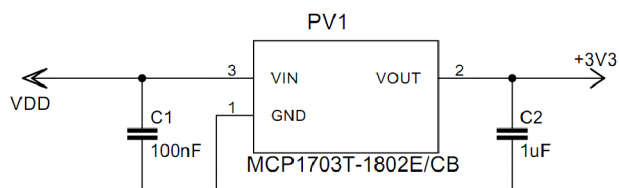


Obr. 39: Fyzické schéma CO₂-EVAL

7.1.1 Napájení

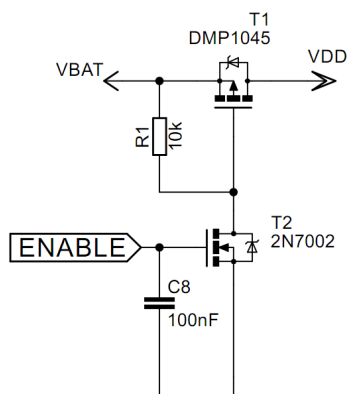
Napájení zajišťuje 3,6V baterie z DK-EVAL. Z důvodu rozdílného napájecího napětí pro senzory je použit zvyšující měnič MT3608. Měnič na 5 V je použit pro napájení senzoru CDM7160. Byl použit

LDO stabilizátor pro napětí 3,3 V upravující napětí z baterie. Úpravu napětí zajišťuje LDO stabilizátor 3,3 V Microchip Inc. Jedná se o LDO MCP1700/3300T s výstupním napětím napětí 3,3 V. LDO v tomto zapojení plní funkci napěťové reference pro DD1.



Obr. 40: Zapojení LDO stabilizátoru

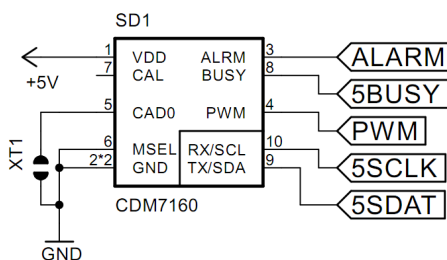
Pro odpojení částí s napájecím napětím 5 V bylo použito MOSFET tranzistorů T2 (2N7002) s N kanálem a T1 (DMP1045) s P kanálem. Ovládání spínání je pomocí (DC)TR-72 pinem C8. Tím je možné snížit spotřebu a prodloužit provoz na baterii.



Obr. 41: Zapojení spínání napájení senzorů

7.1.2 Senzory

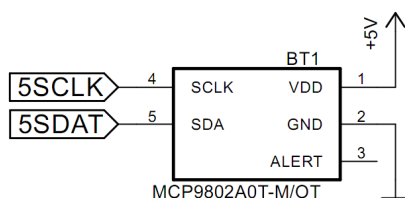
Hlavním senzorem je senzor CO₂ CDM7160, který je napájen 5 V. Pro komunikaci s (DC)TR-72 byla použita sběrnice I²C. Protože senzor může pracovat na stejných pinech přes UART, je nutné trvale spojit piny MSEL a GND pro volbu I²C. Protože senzor CDM7160 pracuje s 5V CMOS logikou, je připojen přes převodník úrovní DD1 (TXS0104). Port BUSY je připojen přes převodník úrovní na port C1. Senzor je vybaven výstupem ALARM, který přechází do log. 1 v případě překročení nastavených prahových hodnot (registr ALLO a ALHI). Výstup PWM slouží pro výstup ve formě pulzně-šířkové modulace (PWM) v rozsahu 0-5000 ppm. Pro účely testování jsou připojeny LED na výstupy BUSY, ALARM a PWM. Propojením XT1 se provádí volba adresy na I²C sběrnici mezi adresami 0b1101000, 0b1101001 (Výchozí).



Obr. 42: Zapojení senzoru CO₂

Senzor CO₂ je připojen k modulu pomocí precizních pinových lišt zapájených do kontaktů na DPS senzoru. DPS modulu je osazena precizní patící. Takto vznikne rozebíratelné spojení pro případ výměny senzoru.

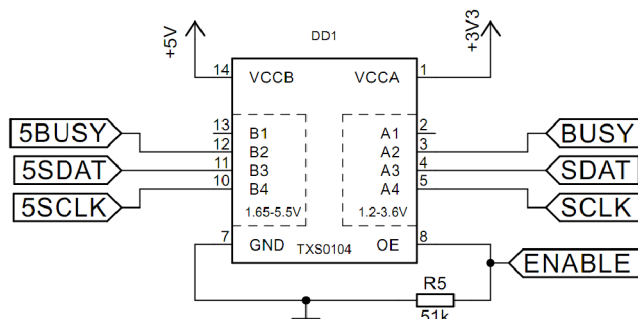
Za účelem ukázky práce s více zařízeními na sběrnici I²C a získávání doplňujících informací o prostředí je modul vybaven teploměrem MCP9802. Tento senzor umožňuje měřit teplotu v rozsahu (-55, 125)°C, s rozlišením 9-12bitů. Po dotazu na adresu ukazatele 00 jsou postupně získány dva Byte hodnot teploty ve formátu big-endian (MSB, LSB).



Obr. 43: Zapojení senzoru teploty

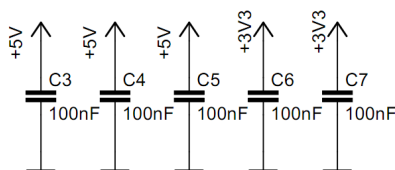
7.1.3 Ostatní obvody

Pro zajištění správných logických úrovní byl použit převodník úrovní TXS0104 od společnosti Texas instruments Inc., který je určen pro použití na sběrnicích typu open-drain. Obvod obsahuje interní 10kΩ pull-up rezistory, proto není zapotřebí používat externí rezistory. Logické úrovně jsou zvoleny dle napětí na pinech V_{CCA}(3,3 V) a V_{CCB}(5 V). Obvod je možné vypnout přivedením logické 0 vstupu OE (output enable).



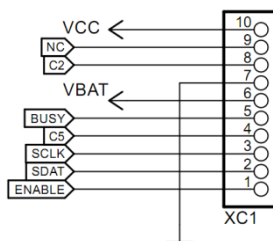
Obr. 44: Zapojení převodníku logických úrovní

Pro zajištění správné funkčnosti jsou integrované obvody doplněny o blokovací kondenzátory 100 nF co nejbližže pouzder integrovaných obvodů. Kondenzátory jsou zapojeny mezi napájecí piny integrovaných obvodů a GND.



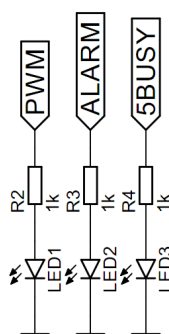
Obr. 45: Zapojení blokovacích kondenzátorů

Pro připojení k DK-EVAL-04x je použit pinový konektor, jehož zapojení odpovídá DK-EVAL-04x. Pin „1“ je označen servisním potiskem na DPS modulu.



Obr. 46: Zapojení konektoru DK-EVAL-04x

Pro demonstrační účely jsou připojeny indikační LED na piny BUSY, ALARM a PWM. Pro účely testování jsou vyvedeny testovací body GND, BUSY, ALARM a PWM, na které je možné připojit sondy osciloskopu nebo multimetru.



Obr. 47: Zapojení indikačních LED

7.1.4 Postup osazování

Pro osazování je vhodné používat mikropáječku, v lepším případě horkovzdušnou pájecí stanici nebo pájecí pec. Nejprve byly osazovány součástky ze strany TOP, až byly osazeny všechny SMD součástky na této straně, pokračuje se stranou BOTTOM. Seznam použitých součástek je uveden v Příloze J. Osazuje se dle následujícího osazovacího postupu.

Osazovací postup:

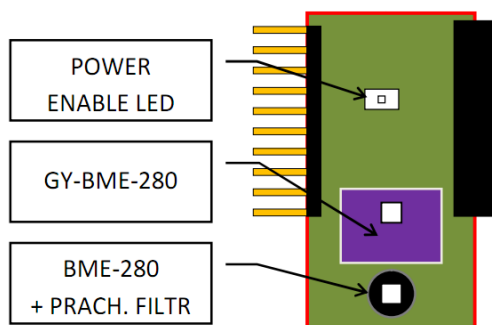
1. Integrované obvody a tranzistory
2. Pasivní SMD prvky (rezistory, kondenzátory) a LED
3. Konektory a testovací body



Obr. 48: Fotografie modulu CO₂-EVAL připojeného k DK-EVAL-04x (Pohled shora)

7.2 Modul BME280-EVAL

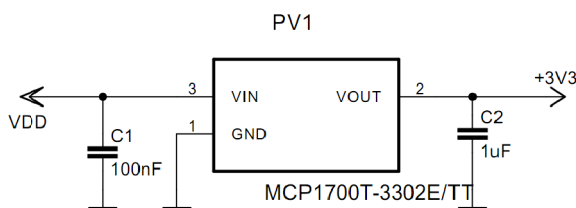
Navržený výukový modul slouží jako výukový a demonstrační přípravek pro podporu výuky v oblasti návrhu a realizace měřicích systémů pro měření environmentálních veličin a IoT. Modul je koncipován jako průběžný v rámci DDC. Výukový modul je osazen senzorem teploty, atmosférického tlaku a vlhkosti BME280 od firmy Bosch. Senzor je kompenzován pomocí koeficientů uložených v jeho paměti. Výsledné hodnoty je nutné přepočítat za pomoci kompenzačních koeficientů externě. Kompletní schéma je uvedeno v Příloze C.



Obr. 49: Topologie BME280-EVAL

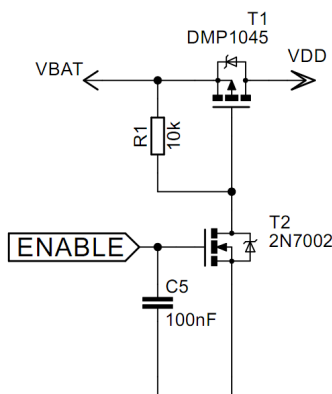
7.2.1 Napájení

Napájení zajišťuje 3,6 V baterie z DK-EVAL. Úpravu napětí zajišťuje LDO stabilizátor 3,3 V. Jedná se o LDO MCP1700/3300T firmy Microchip Inc. s výstupním napětím napětí 3,3 V.



Obr. 50: Zapojení LDO stabilizátoru

Pro odpojení napájení senzoru bylo použito MOSFET tranzistorů T2(2N7002) s N kanálem a T1(DMP10450) s P kanálem. Ovládání spínání je pomocí (DC)TR-72 pinem C8. Tím je možné snížit spotřebu a prodloužit provoz na baterii.



Obr. 51: Zapojení spínání napájení senzoru

7.2.2 Senzor

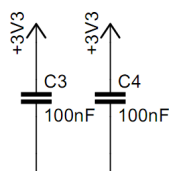
Senzor BME280 je možné na tomto modulu použít při dvou modifikacích. Senzor BME280 je možné osadit přímo na DPS na pozici B1, nebo pomocí konektoru XC3 je možné použít hotový modul senzoru GY-BME280. Senzor osazený na DPS je možné vybavit prachovým filtrem SF2.

V obou případech je napájení 3,3 V. I²C sběrnice je vybavena pull-up rezistory 10 kΩ. Adresa senzorů je zvolena pevně pro případ použití dvou BME280 zároveň. Adresy na I²C sběrnici jsou rozdílné, 0111 0110 pro GY-BME280 a 0111 0111 pro B1.

Konektor XC3 je možné použít pro připojení i jiného zařízení vybaveného I²C sběrnici, pokud využívá logické úroveň 3,3 V.

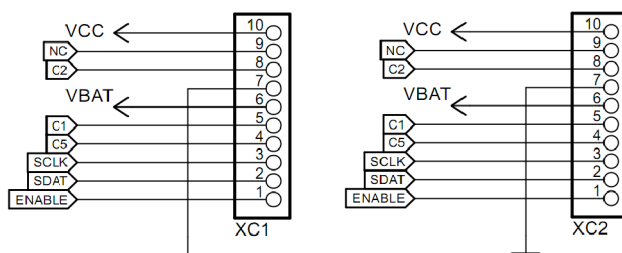
7.2.3 Ostatní obvody

Pro zajištění správné funkčnosti jsou integrované obvody doplněny o blokové kondenzátory 100nF co nejblíže pouzder integrovaných obvodů. Kondenzátory jsou zapojeny mezi napájení a GND.



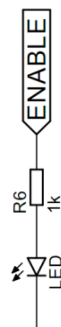
Obr. 52: Zapojení blokových kondenzátorů

Pro připojení k DK-EVAL-04x je použit pinový konektor, jehož zapojení odpovídá DK-EVAL-04x. Pin „1“ je označen servisním potiskem na DPS modulu. Modul je koncipován jako průběžný proto obsahuje dva shodné konektory XC1 je typu MALE a XC2 typu FEMALE. Zapojení obou konektorů je shodné.



Obr. 53: Zapojení konektoru DK-EVAL-04x (Vstupní, Výstupní)

Pro demonstrační účely je připojena indikační LED na pin ENABLE (C8). Pomocí LED je možné sledovat ovládání spínání napájení senzoru.



Obr. 54: Zapojení indikační LED

7.2.4 Postup osazování

Pro osazování je vhodné používat mikropáječku, v lepším případě horkovzdušnou pájecí stanici nebo pájecí pec. Nejprve byly osazovány součástky ze strany TOP, až jsou osazeny všechny SMD součástky na této straně, pokračuje se stranou BOTTOM. Seznam použitých součástek je uveden v Příloze J. Osazuje se dle následujícího osazovacího postupu.

Osazovací postup:

1. Integrované obvody a tranzistory
2. Pasivní SMD prvky (rezistory, kondenzátory) a LED
3. Konektory a testovací body



Obr. 55: Fotografie modulu BME280-EVAL připojeného k DK-EVAL-04x (Pohled shora)

7.3 Energetická bilance

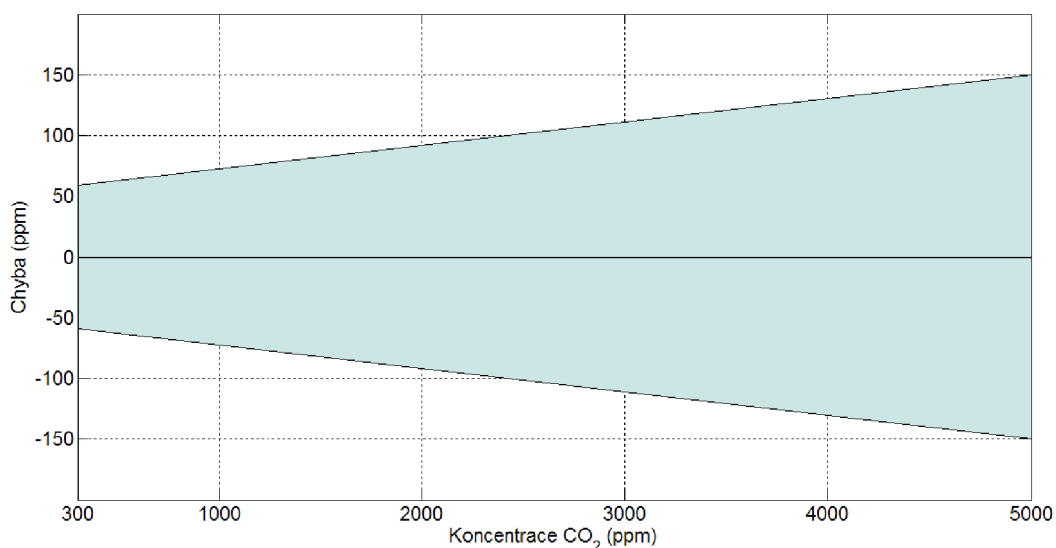
Doba provozu je závislá na aktuální konfiguraci. Hlavními faktory ovlivňující délku provozu na baterii jsou frekvence odesílání dat a použití RGB LED.

7.4 Chyby měření

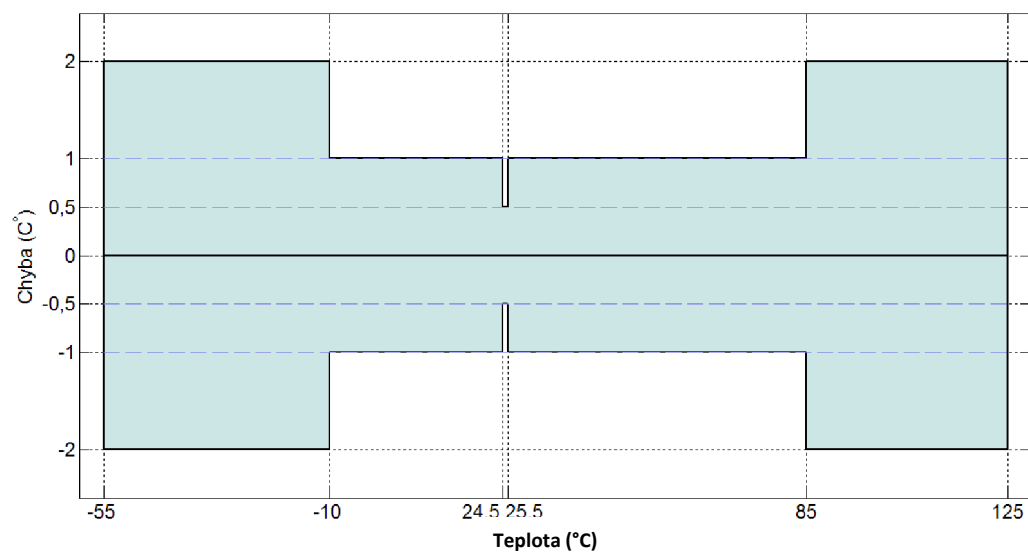
Přesnost měření tohoto přístroje je dána přesnostmi jednotlivých použitých senzorů. Níže popsané hodnoty platí pro běžné pokojové podmínky. Teplota v rozsahu 0 až 50°C a relativní vlhkost do 85%. Koncentrace CO₂ v rozsahu 300 – 5000 ppm. Mimo tyto rozsahy dochází ke zvýšení chyby měření.

Tab. 12: Chyby měření při dodržení vztažných podmínek [8], [10], [11]

	Chyba měření	Senzor
Koncentrace CO ₂	$\pm 50 \text{ ppm} + 3 \% \text{ ze čtené hodnoty}$	CDM7160
Teplota	$\pm 0,5^\circ\text{C}$	BME280
	$\pm 1^\circ\text{C}$	MCP9802
Atmosférický tlak	$\pm 1 \text{ hPa}$	BME280
Relativní vlhkost	$\pm 3 \%$	BME280



Obr. 56: Graf chyby měření CDM7160



Obr. 57: Graf chyby měření MCP9802

8 Program pro obsluhu DPA

Kapitola popisuje program pro obsluhu DPA protokolu, který je uložený v (DC)TR modulech. Programy pro výukové moduly jsou odvozené od programu pro měřicí přístroj.

Za účelem rozšíření funkcí OS byla vytvořena uživatelská nadstavba obsluhující převážně vnější chování zařízení. Bylo nutné implementovat obsluhu komunikace po sběrnici I²C pro jednotlivé senzory (MCP9802, CDM7160, BME280). Zároveň bylo nutné zajistit fungování RGB LED a tlačítka.

Jsou použity stavy Init, Idle, DpaRequest, BeforeSleep, AfterSleep. Jednotlivé přechody mezi stavy jsou řízeny událostmi pomocí OS. V těchto stavech jsou volány funkce pro obsluhu funkcionalit přístroje.

8.1 Stav Init

Tento stav nastává pouze při prvním běhu programu. Dochází k nastavení vstupních a výstupních portů, komunikačních rozhraní a časovače.

8.2 Stav Idle

V tomto stavu program čeká na požadavek a zároveň je vyčítána hodnota ze senzoru CO₂ a dle konfigurace rozsvěcena RGB LED a kontrolováno tlačítko.

8.3 Stav DpaRequest

V tomto stavu jsou nejprve vyčtena data ze všech připojených senzorů. Naměřená data jsou uspořádána do podoby, ve které je možné jejich odeslání pomocí DPA.

8.4 BeforeSleep

V tomto stavu jsou automaticky vypnuta hardwarová rozhraní. Před usmáním modulu je nutné vypnout I²C sběrnici, protože by mohlo docházet k nedefinovaným logickým stavům na pinech sběrnice.

8.5 AfterSleep

V tomto stavu jsou automaticky zapnuta hardwarová rozhraní, jde o inverzní operaci k BeforeSleep. Po probuzení modulu je nutné znovu zapnout I²C sběrnici.

8.6 Specifikace DPA komunikace

Přístroj pro měření koncentrace CO₂ odesílá data dle zvolené konfigurace. V případě plné verze se odesílá 12 Bytu dat. V prvních 2 Bytech je změřená hodnota koncentrace CO₂, ve druhých 2 Bytech je změřená teplota. Následujících 8 Bytů jsou surová data ze senzoru BME280. Na tento snímač se poté zašle následující DPA paket.

DPA request - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)
01	00	20	00	1F	FF

DPA response - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	DPA	CO2 (Lo)	CO2 (Hi)	TEMP1 (Lo)	TEMP1 (Hi)
01	00	20	80	1F	FF	00	55	5A	02	80	1B
P_raw (Lo)	P_raw (Mid)	P_raw (Hi)	T_raw (Lo)	T_raw (Mid)	T_raw (Hi)	RH_raw (Lo)	RH_raw (Hi)				
90	CE	50	20	3D	82	F2	79				

Výpočet koncentrace CO₂ z přijatých dat:

$$255 \cdot CO2_{HI} + CO2_{LO} = C_{CO2} \text{ (ppm)}$$

kde : CO_{2HI} - horní Byte CO2value

CO_{2LO} - dolní Byte CO2value

Výpočet teploty ze senzoru MCP9802 (je-li použit, jinak 0xFFFF) z přijetých dat:

$$(1 - T_{HI}[7]) \cdot (T_{HI}[0:6] + T_{LO} \cdot 2^{-8}) - (T_{HI}[7]) \cdot (T_{HI}[0:6] + T_{LO} \cdot 2^{-8}) = T \text{ (°C)}$$

kde : T_{HI} - horní Byte TEMP1value

T_{LO} - dolní Byte TEMP1value

Vyčtení kompenzačních konstant z RAM pomocí DPA request

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	START ADDR	BYTE COUNT
01	00	05	00	1F	FF	00	24

Odpověď DPA Response

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	DPA	Dig_T1 (LO.HI)	Dig_T2 (LO.HI)	Dig_T3 (LO.HI)	Dig_P1 (LO.HI)
01	00	05	80	1F	FF	00	55	0A.6F	42.68	32.00	72.92
Dig_P2 (LO.HI)	Dig_P3 (LO.HI)	Dig_P4 (LO.HI)	Dig_P5 (LO.HI)	Dig_P6 (LO.HI)	Dig_P7 (LO.HI)	Dig_P8 (LO.HI)	Dig_P9 (LO.HI)	Dig_H1 (LO.HI)	Dig_H2 (LO.HI)	Dig_H3 (LO.HI)	Dig_H4 (LO.HI)
36.D6	D0.0B	99.1F	86.FF	F9.FF	AC.26	0A.D8	BD.10	4B.00	6B.01	00.00	3C.01
Dig_H5 (LO.HI)	Dig_H6 (LO.HI)										
32.00	1E.00										

Signalizace RGB LED je nastavována zápisem konstanty do EEPROM modulu. Hodnotou zapsanou do EEPROM se provádí nastavení, kdy 1 = zapnuto, 0 = vypnuto.

Nastavení signalizace koncentrace CO₂ pomocí RGB LED

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	EEPROM ADDR	VALUE
01	00	03	01	1F	FF	01	01

Nastavení signalizace vyčtení dat pomocí bliknutí RGB LED

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	EEPROM ADDR	VALUE
01	00	03	01	1F	FF	02	01

8.7 Připojení do IQMESH

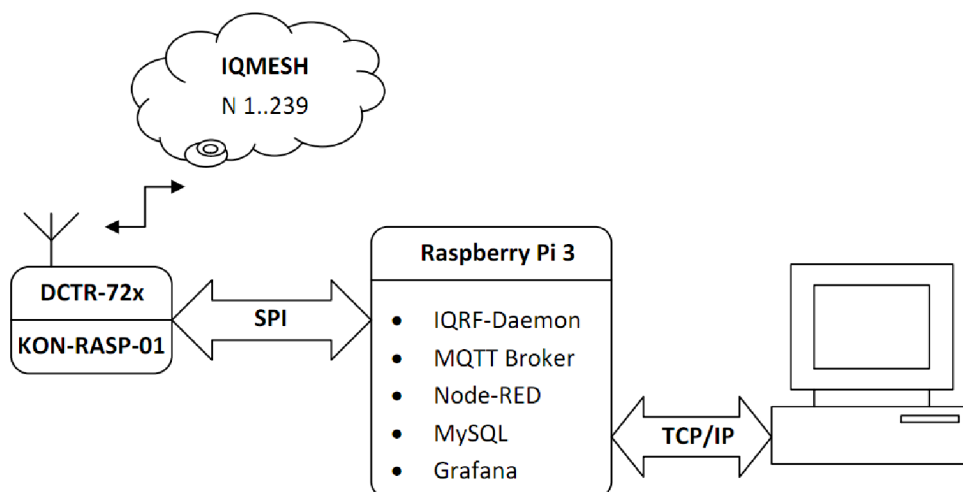
Proces registrace modulu do IQMESH sítě se v terminologii IQRF nazývá Bond a opačný proces Unbond. To se provádí stiskem tlačítka BOND umístěného na zadní straně přístroje. Pro správnou funkci sítě je nutné provést mapování sítě pomocí příkazu „Discovery“. Nejjednodušším způsobem je použít IQRF IDE, kdy prostřednictvím tohoto vývojového prostředí je možné konfigurovat síť.

Pro úspěšné provedení mapování sítě je nutné, aby v této době neprobíhala jiná komunikace v síti.

9 Zpracování a vizualizace měřených dat prostřednictvím vybrané technologie

9.1 Zpracování a archivace dat

Naměřená data jsou od koordinátora IQMESH sítě přijata aplikací IQRf-Daemon a následně předávána prostřednictvím MQTT a jsou zpracována aplikací vytvořenou v prostředí Node-RED. Takto zpracovaná data jsou již v přímo čitelné podobě zapisována do lokální MySQL databáze.



Obr. 58: Topologické schéma zpracování a archivace naměřených dat

9.1.1 Koordinátor IQMESH sítě

Koordinátor IQMESH sítě pracuje v tomto případě v režimu automatického dotazování (polling) na uživatelskou periferii. Takto získané zprávy jsou zdánlivě asynchronní. V případě dotazu na kompenzační konstanty senzoru BME280, které jsou získány pomocí periferie RAM, však získáváme synchronní zprávu.

9.1.2 Aplikace IQRf-Daemon

Aplikace IQRf-Daemon byla vyvinuta firmou Microrisc s.r.o. a slouží k obsluze koordinátora IQMESH sítě připojeného prostřednictvím přípravku KON-RASP-01 k podporovanému jednodeskovému počítači (Raspberry Pi, UpBoard). K této aplikaci je možné se připojit prostřednictvím UDP kanálu z prostředí IQRf IDE. Aplikace musí být přepnuta do servisního (service) režimu.

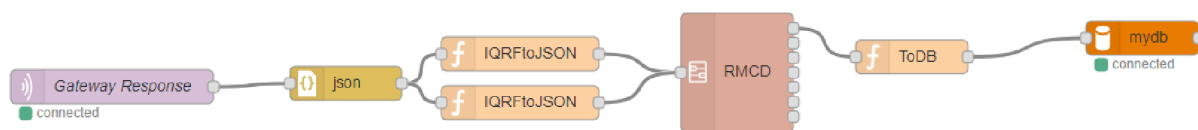
Pro komunikaci s ostatními aplikacemi je zapotřebí použít MQTT. Aplikace musí být přepnuta do operačního (operational) režimu. Aplikace je připojena k MQTT broker, ve kterém založí dvě témata (topic) – DpaRequest a DpaResponse. Prostřednictvím těchto dvou témat jsou předávány datové zprávy.

V tomto případě je použit lokální MQTT broker, je však možné se k němu připojit i vzdáleně. Například pro účely ladění je možné použít aplikaci PAHO Client.

Aplikaci je možné konfigurovat prostřednictvím webového rozhraní nebo zápisem do konfiguračních souborů v adresáři aplikace.

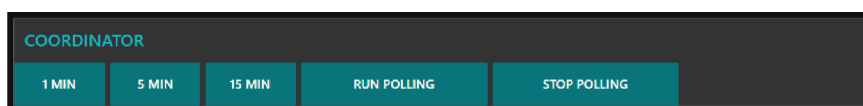
9.1.3 Aplikace v Node-RED

Vytvořená aplikace v grafickém programovacím prostředí Node-RED zajišťuje ukládání naměřených dat do MySQL databáze. Vytvořené funkce jsou naprogramovány v jazyce JavaScript. Data jsou získána prostřednictvím MQTT (fialový blok), kde jsou data obdržena jako „DpaResponse“ ve formátu textu. Text je převeden do formátu JSON. Blok `IQRfToJSON` je zdvojen z důvodu nutnosti zpracovávat synchronní a asynchronní zprávy, které mají rozdílnou strukturu. Data jsou následně převedena a zpracována v bloku `RMCD`. Blok `RMCD` mimo jiné zpracovává zprávy obsahující kompenzační konstanty ze senzoru BME280, konstanty jsou pro každý senzor uloženy samostatně. Data jsou uložena do MySQL databáze prostřednictvím SQL příkazu `INSERT` sestaveného v bloku `ToDB`. Před uložením je u dat ověřeno, zda hodnoty odpovídají rozsahu daného senzoru.



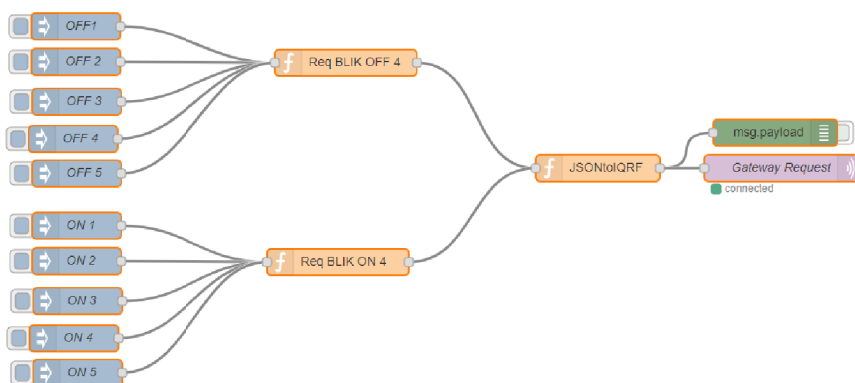
Obr. 59: Schéma programu pro ukládání do MySQL databáze v prostředí Node-RED

Bylo vytvořeno jednoduché webové rozhraní, prostřednictvím kterého je možné volit některé nastavení koordinátora IQMESH sítě. Je možné vybírat periodu sběru dat a aktivovat/deaktivovat sběr dat.



Obr. 60: Jednoduchý webový ovládací panel koordinátora IQMESH sítě

Nastavení signalizace RGB LED a signalizaci komunikace pro jednotlivé uzly je možné prostřednictvím ovládacích prvků přímo v programovacím prostředí.



Obr. 61: Ovládací prvky nastavení signalizace přenosu dat v prostředí Node-RED

9.2 Vizualizace prostřednictvím webového rozhraní

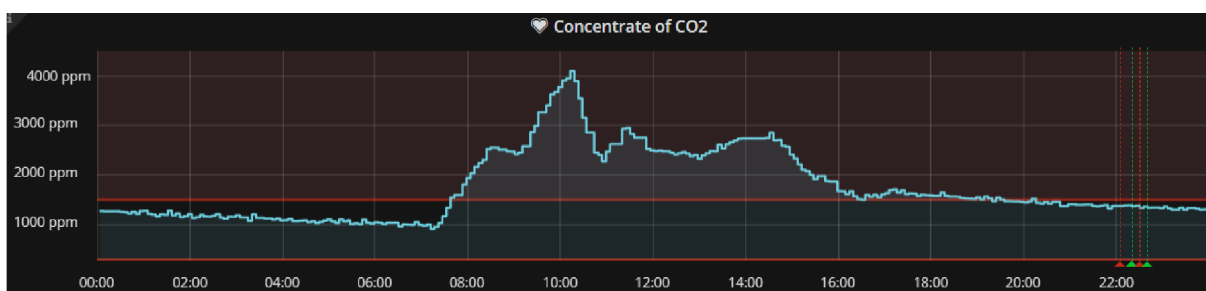
9.2.1 Prostředí Grafana

Ve vizualizačním prostředí Grafana byla vytvořena aplikace pro vizualizaci naměřených dat. Jako zdroj dat slouží tabulka naměřených dat v MySQL databázi. Zobrazovány jsou průběhy za zvolený

časový interval a poslední změřená hodnota. Byly nastaveny hodnoty výstražných stavů, kdy dojde k zaslání zprávy o překročení některého z měřených parametrů.



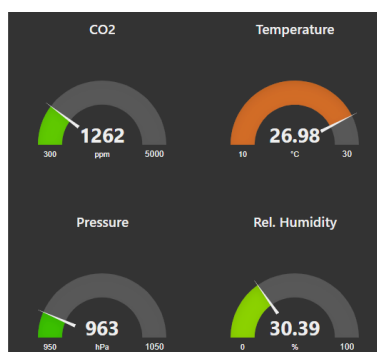
Obr. 62: Okno vizualizace – souhrn



Obr. 63: Vizualizace - Záznam koncentrace CO₂

9.2.2 Prostředí Node-RED - Dashboard

Pro jednoduché vizualizace je možné využít nástavby Dashboard pro Node-RED, které umožňuje vizualizaci dat a použití ovládacích prvků. Tato varianta je vhodná pro zobrazování aktuálních hodnot a ovládací prvky.



Obr. 64: Webová vizualizace Node-RED

9.2.3 Zdroj dat – Data source

Datovým zdrojem pro vizualizaci je lokální MySQL databáze, je však možné použít i externí databázi. Data jsou ukládána do tabulky, která má strukturu, jak je popsána v Tab. 13. Data v této tabulce jsou v přímo čitelné podobě.

Tab. 13: Struktura tabulky v MySQL databázi

Název	Id	Node	CO2	Temperature	Pressure	Humidity	Rssi	TimeStamp
Datový typ	int	int	int	float	float	float	int	timestamp
Příklad	251154	2	566	26.70	964.6	39.66	92	2018-03-12 16:12:31

Pro propojení s vizualizačním prostředím Grafana je nutné nastavit „data source“. Grafana z důvodu bezpečnosti neumožňuje SQL příkazy, které by upravovaly tabulky. Je však vhodné použít přístupové údaje do databáze, které uživateli umožňují používat pouze příkaz `SELECT`.

10 Vyhodnocení naměřených hodnot

Výsledkem této práce je zjištění, jakou část výuky nebo pracovní doby stráví studenti a zaměstnanci v prostředí, které může mít vliv na jejich pracovní výkonnost. Na základě takto zjištěných údajů je možné doporučit úpravu režimu větrání nebo rekuperace.

10.1 Metodika měření

Měřicí přístroj bylo zapotřebí umístit tak, aby byly omezeny nechtěné vlivy na měření.

- Přístroj nesmí být v přímém proudění vzduchu, například u dveří nebo oken.
- Přístroj nesmí být v bezprostřední blízkosti zdroje CO₂, například na stole před studenty
- Přístroj nesmí být zakryt závěsem či jinou textilií
- Přístroj nesmí být vystaven přímým tepelným účinkům, například: chlazení přístrojů (počítače, monitory, notebooky, klimatizace), topení
- Přístroj by měl monitorovat prostředí přibližně ve výšce hlavy sedícího člověka

Těmto podmínkám ve většině případů vyhovuje umístění u tabule ve výšce 75 – 150 cm, přístroj by neměl být zakrýván křídlem tabule.

10.2 Metodika vyhodnocení

Z naměřených hodnot byly vytvořeny grafy kumulativních četností. Z takto získaných výsledků je možné stanovit, jakou část pracovní doby stráví zaměstnanci a studenti v prostředí, které je možné rozdělit do následujících kategorií:

- Požadované
- Akceptovatelné
- Nevyhovující

Kategorie byly stanoveny dle hodnot uvedených v nařízení vlády č. 93/2012. Toto stanovuje limitní hodnoty pro různé pracovní prostory. Pro školská zařízení je nutno vycházet z předepsaných hodnot uvedených v příloze 3 vyhlášky MŠMT č. 343/2009 Sb. V tomto případě jsou vybrány hodnoty pro školní třídy, učebny a kancelářské prostory.

Vyhláškou č. 20/2012 Ministerstva pro místní rozvoj je mimo jiné stanovena maximální přípustná koncentrace CO₂ v pobytových místnostech na 1500 ppm. Hodnoty nad touto hranicí lze označit za nevyhovující. Na základě těchto předpisů byly nastaveny limitní hodnoty pro měřené veličiny.

Tab. 14: Limitní hodnoty měřených veličin

-	Minimální hodnota	Doporučené hodnoty	Maximální hodnota
Koncentrace CO ₂ (ppm)	-	800 – 1000	1500
Teplota (°C)	20 (výjimečně 18)	20 – 24	28 (výjimečně 30)
Relativní vlhkost (%)	30	30 - 65	70

11 Testování vytvořeného měřicího systému

Vytvořený měřicí systém byl testován v kancelářích a učebnách Katedry kybernetiky a biomedicínského inženýrství. Během testování byla mimo jiné sledována maximální doba provozu na baterii.

Kalibrace byla provedena přístrojem iBrid MX6.

Testováním byla zjišťována doba provozu na baterii při změně režimu. Byl měněn interval odesílání dat (1 min a 10 min) a aktivována nebo neaktivována signalizace RGB LED.

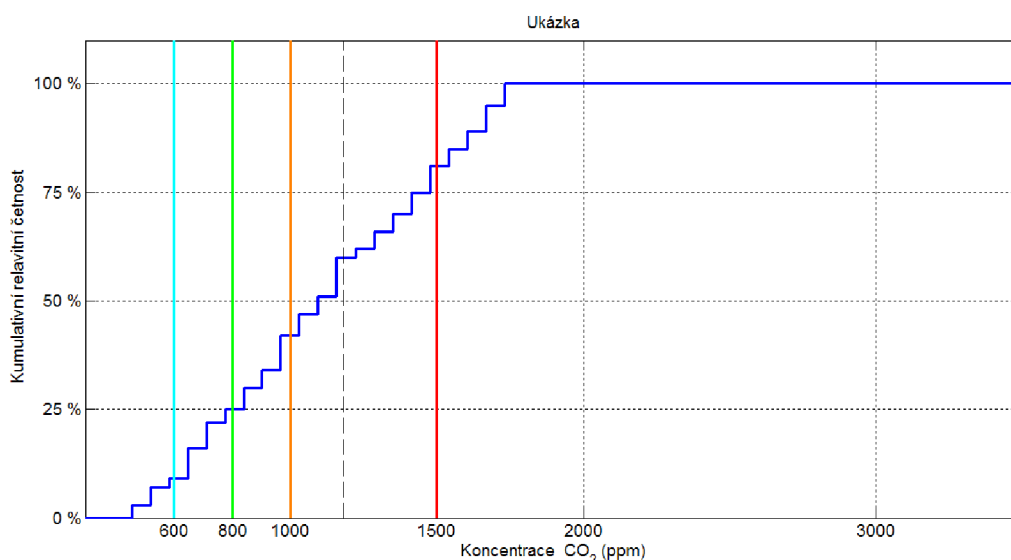
Tab. 15: Srovnání výdrže baterie v různých režimech

	Odesílání 1 min	Odesílání 10 min
Aktivní RGB LED	16-20 h	22-24 h
Neaktivní RGB LED	32-34 h	36-39 h

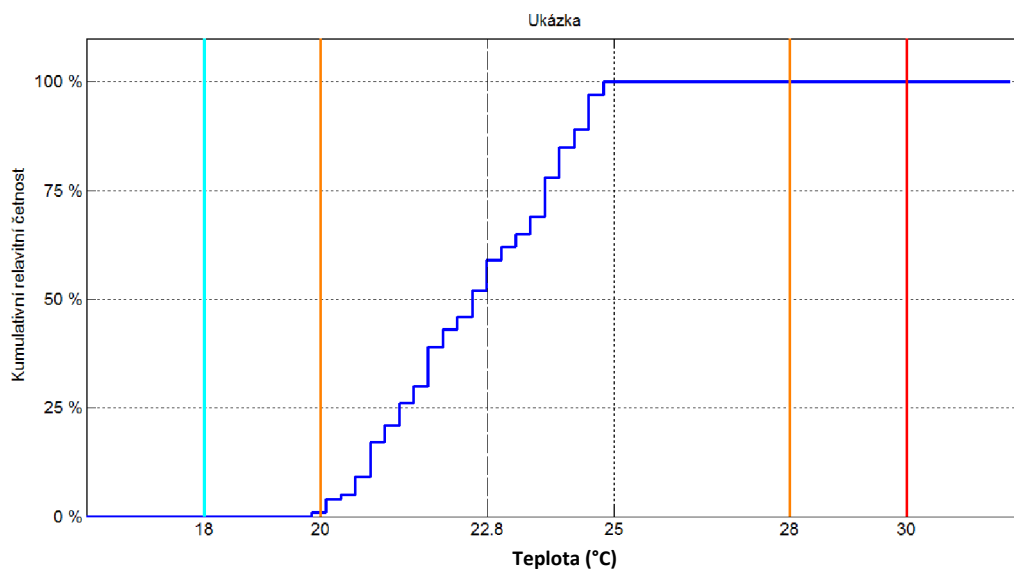
11.1 Zpracování naměřených dat

Naměřená data je možné zobrazovat v prostředí Grafana jako časový průběh jednotlivých environmentálních veličin. Pro vyhodnocení je vhodné použít aplikaci vytvořenou v Matlabu, kde je možné vidět relativní kumulativní četnosti hodnot environmentálních veličin (Příloha I).

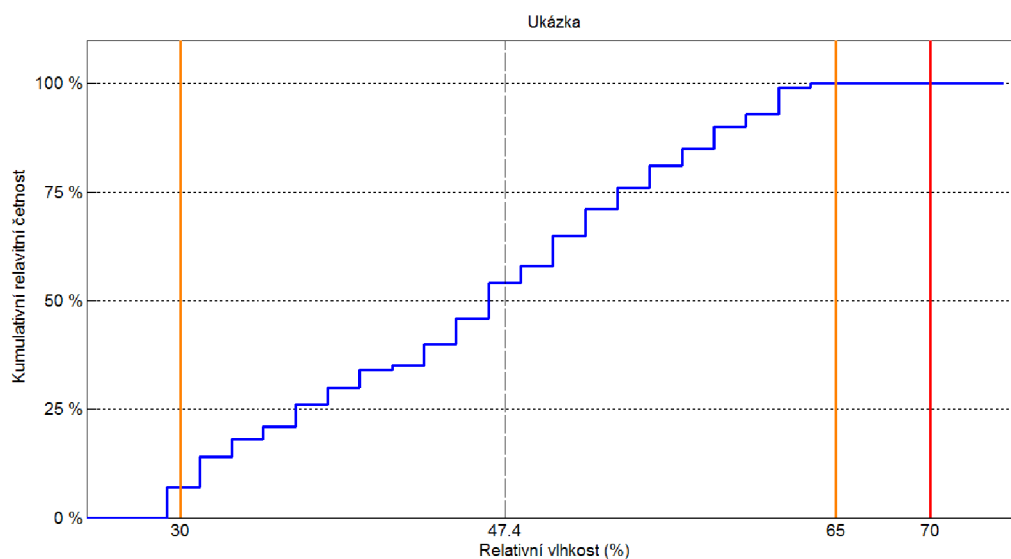
Z naměřených hodnot jsou vybrány hodnoty dle rozvrhu nebo pracovní doby. Tyto data je možné vyhodnotit pomocí kumulativních četností. Na grafu kumulativních četností je možné přehledně vidět, jakou část vybraného časového úseku jsou hodnoty měřených veličin nižší než limity (Tab. 14). Stejný postup je možný i pro ostatní vyhodnocované veličiny.



Obr. 65: Ukázka grafu kumulativní četnosti datového výběru - Koncentrace CO₂



Obr. 66: Ukázka grafu kumulativní četnosti datového výběru - Teplota



Obr. 67: Ukázka grafu kumulativní četnosti datového výběru - Relativní vlhkost

11.2 Vizualizace aktuálních dat

Jedním ze způsobů vyhodnocení je vizualizace aktuálních (posledních) hodnot. Na takovéto obrazovce je možné snadno identifikovat překročení některého z nastavených limitních parametrů nebo odhalit nefunkční čidlo.

EA306 (NOD 1)	EA313 (NOD 2)	EB305 (NOD 3)	EB342 (NOD 4)	EB305A (NOD 5)
1065 ppm	478 ppm	1096 ppm	472 ppm	N/A
EA306 (NOD 1)	EA313 (NOD 2)	EB305 (NOD 3)	EB342 (NOD 4)	EB305A (NOD 5)
27 °C	27 °C	25 °C	24 °C	N/A
EA306 (NOD 1)	EA313 (NOD 2)	EB305 (NOD 3)	EB342 (NOD 4)	EB305A (NOD 5)
39 %H	35 %H	42 %H	40 %H	N/A

Obr. 68: Vizualizace aktuálních hodnot měřených veličin

12 Zhodnocení výsledků

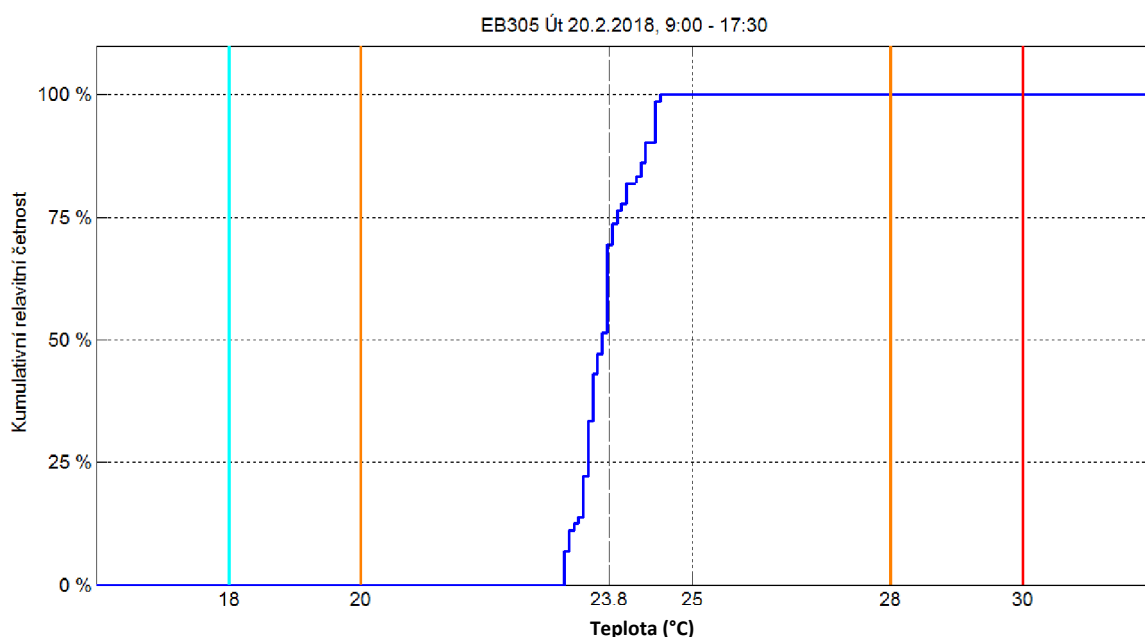
Na základě vypracované metodiky měření a vyhodnocení byla vyhodnocena naměřená data. Limitní hodnoty jsou v grafech barevně vyznačeny červeně/modře. Oranžově jsou označeny hodnoty, které by neměly být překračovány. Pro ukázkové vyhodnocení byly vybrány naměřené hodnoty z laboratoře EB305 ze dne 20. 2. 2018 v době konání výuky (9:00 – 17:30).

Tab. 16: Parametry naměřených hodnot

	Minimum	Střední hodnota	Kvantily			Maximum
			Q0,25	Q0,5	Q0,75	
CO₂ (ppm)	951	2164	1716	2361	2569	3032
Teplota (°C)	23,1	23,8	23,5	23,7	23,9	24,6
Rel.vlhkost (%)	35,5	42,8	41,3	43,1	44,8	50

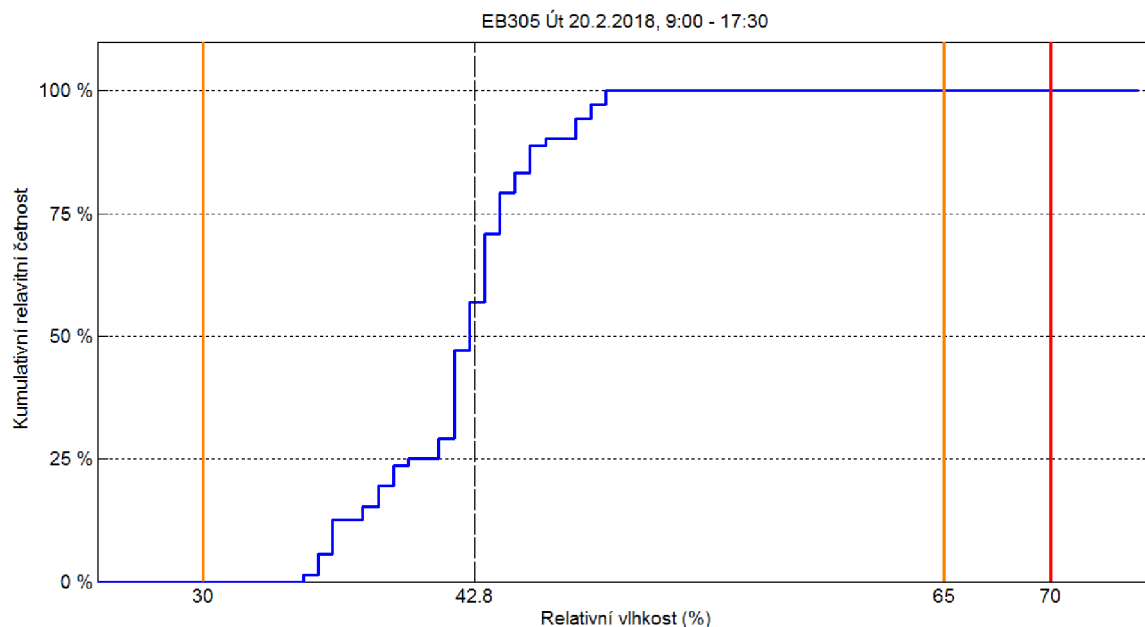
Pro lepší názornost jsou data zpracována do grafů relativní kumulativní četnosti. Na ose x je měřená veličina. Relativní kumulativní četnost vyjadřuje procento vzorků menších než daná hodnota na ose y.

V grafu (Obr. 69) relativní kumulativní četnosti teploty je vidět, že nedochází k překračování stanovených limitů (viz Tab. 14). Teplota se pohybuje okolo doporučení hodnoty 24°C.



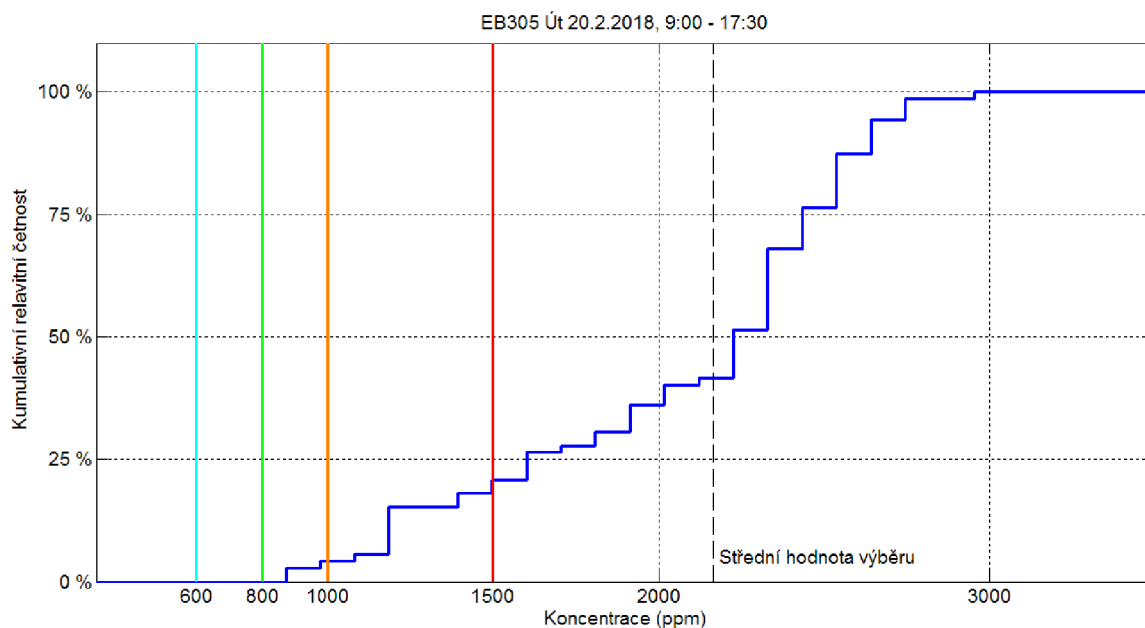
Obr. 69: Graf kumulativní četnosti datového výběru - Teplota

V grafu (Obr. 70) relativní kumulativní četnosti relativní vlhkosti je vidět, že nedochází k překračování stanovených limitů (viz Tab. 14).



Obr. 70: Graf kumulativní četnosti datového výběru - Relativní vlhkost

V grafu relativní kumulativní četnosti koncentrace CO_2 (Obr. 71) je možné odečíst, že méně než 25% pobytu v místnosti byly hodnoty nepřekračující limitní hodnotu 1500 ppm (Tab. 14). Z toho vyplývá, že více než 75% pobytového času byla v místnosti překročena limitní hodnota koncentrace CO_2 .



Obr. 71: Graf kumulativní četnosti datového výběru - Koncentrace CO_2

12.1 Možnosti dalšího rozvoje měřicího systému

Na základě zkušeností s vytvořeným měřicím přístrojem je možné navrhnout jeho další verzi, která bude rozšířena o další senzory a funkcionality. Například by se mohlo jednat o senzor oxidu uhelnatého (CO), metanu (CH_4), osvětlení, prašnosti, vibrací a dalších. Nabízí se možnost doplnění o zobrazovací jednotku - OLED displej nebo LED displej.

Například při rozšíření o senzor CH₄ je možné použít zařízení v místnostech s plynovými spotřebiči pro detekci případného úniku zemního plynu.

Další možnosti se nabízejí v oblasti vyhodnocování dat ze senzorů. Na základě naměřených dat by bylo možné identifikovat události na základě změn jednotlivých měřených veličin.

Z důvodu využití paměti programu vyvstává potřeba doplnění o mikrokontrolér, který bude zajišťovat předzpracování naměřených dat. Lze použít některý z mikrokontrolérů s nízkou spotřebou dostupných na trhu.

Vyvinutá zařízení mohou sloužit jako základ pro vznik testovacího polygonu pro IoT a IQRf. Toto testovací a demonstrační pracoviště by umožnilo efektivní prezentaci využití technologie bezdrátového přenosu dat a jejich využití.

Závěr

Jedním z hlavních témat dnešní doby je snížení zdravotních rizik pracujících. Přispět k tomu může i tato diplomová práce, která se mimo jiné zabývá měřením environmentálních veličin. Cílem této práce byl návrh a realizace měřicího systému a vyhodnocení naměřených dat.

V úvodních kapitolách byl zpracován přehled senzorů oxidu uhličitého (CO₂) a vysvětlen princip jejich fungování. Následným porovnáním byl vybrán vhodný typ senzoru – typ NDIR. Zároveň byl uveden princip měření integrovaného senzoru teploty. Ten byl zvolen s ohledem zaměření práce na základě nejvhodnějších vlastností.

Byl proveden rozbor diferenční spektroskopické metody, která je využívána v senzorech typu NDIR. Tato metoda se vyznačuje vysokou selektivitou a odolností vůči rušení ostatními plyny nebo prachovými částicemi.

V práci jsou popsány fyzikálně - chemické vlastnosti CO₂ a vliv jeho koncentrace na lidský organismus. Také jsou vyjmenovány nejčastější zdroje CO₂ v místnostech a na základě rešerše byl zjištěn nárůst koncentrace CO₂ jako důsledek zvyšování těsnosti vnějšího pláště budov.

S ohledem na zadání práce byl proveden rozbor technologie IQRF v návaznosti na bezdrátový přenos dat. Konkrétně jde o tyto části technologie - Operační systém, IQMESH síť, DPA protokol, (DC)TR moduly a způsoby připojení do nadřazených systémů.

Dále byl proveden rozbor technologií pro zpracování a vizualizaci naměřených dat. Jedná se o grafické programovací prostředí Node-RED, které umožňuje rychlý vývoj aplikace na bázi JavaScript. Je zde uveden princip činnosti protokolu MQTT a způsob předávání dat mezi jednotlivými účastníky komunikace. Pro vizualizační prostředí Grafana byl vytvořen výčet základních vlastností a způsobů organizace vizualizace.

Za účelem splnění cílů práce byl vypracován návrh hybridního měřicího řetězce pro měření zvolených veličin, kterými jsou koncentrace CO₂, teplota, relativní vlhkost a atmosférický tlak. Návrh zahrnuje koncepci měřicích uzlů a centrální jednotky. Na základě tohoto návrhu byl navržen měřicí přístroj pro monitorování environmentálních veličin v místnostech. Tento přístroj slouží k měření koncentrace CO₂, teploty, relativní vlhkosti a atmosférického tlaku, a zároveň slouží jako indikátor koncentrace CO₂ pomocí barvy RGB LED. Přístroj je možné napájet bateriově nebo pomocí micro USB. Přenos dat je realizován pomocí technologií IQRF a DPA protokolu. Tento navržený měřicí přístroj je provozuschopný a také už o něj projevíli zájem zástupci firem.

Na základě tohoto vyvinutého měřicího přístroje jsou vytvořeny výukové a prezentační moduly pro podporu výuky měření environmentálních veličin a IoT. Tyto moduly jsou navrženy tak, aby je bylo možné použít ve vývojovém řetězci DDC společně s DK-EVAL. Za návrh a realizaci modulu CO₂-EVAL bylo uděleno první místo v mezinárodní soutěži IQRF Challenge III (2017) viz Příloha K.

Pro obsluhu DPA protokolu je vytvořen uživatelský program jako nástavba OS v MCU do (DC)TR modulů v měřicích přístrojích. Na základě tohoto programu byly odvozeny programy pro výukové moduly. Tím je využitý celý paměťový prostor pro uživatelskou aplikaci v (DC)TR modulu. Na základě konfigurace uložené v EEPROM je možné měnit vzdáleně nastavení signalizace RGB LED prostřednictvím zaslání DPA příkazu.

Následně byla vytvořena aplikace pro zpracování a archivaci naměřených dat. Zpracování dat probíhá pomocí aplikace v prostředí Node-RED. Zpracovaná data jsou ukládána do MySQL databáze. Pro vizualizaci naměřených hodnot bylo použito prostředí Grafana. Z těchto naměřených hodnot jsou vytvořeny vizualizace časových průběhů i aktuálních hodnot.

Naměřené hodnoty jsou vyhodnocovány v časovém úseku, ve kterém se předpokládá pobyt osob v monitorovaném prostoru.

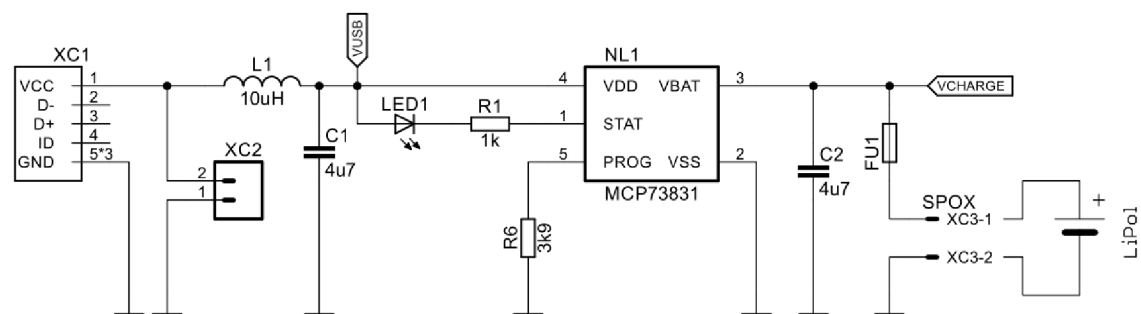
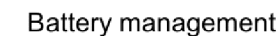
Přínosem této diplomové práce je návrh a realizace měřicího systému, který slouží k měření výše uvedených veličin. Na základě takto získaných údajů je možné stanovit, jakou část pobytového času tráví osoby podle nařízení vlády č. 93/2012 v nevyhovujícím prostředí. Zároveň bude možné navrhnout účinná opatření vedoucí ke zvýšení kvality prostředí na školských pracovištích, kancelářských prostorách nebo ale i v dalších pracovních prostorách, popřípadě domácnostech. Zlepšení prostředí s ohledem na sledované parametry je přitom možné změnou nebo úpravou způsobu větrání v místnostech.

Literatura

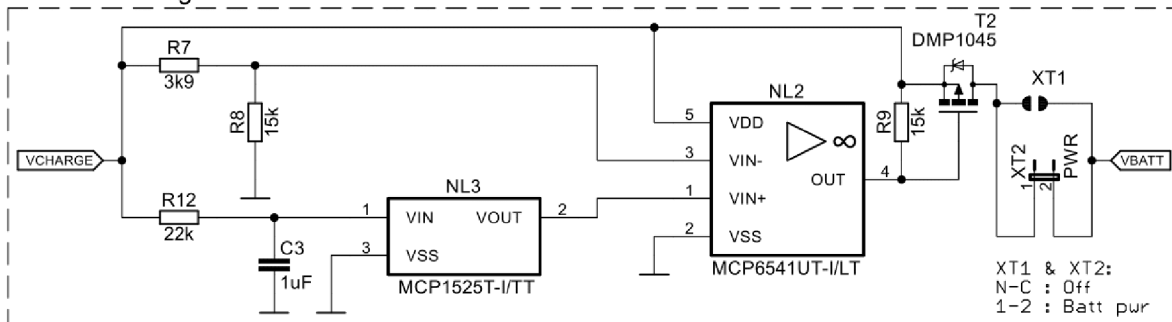
1. **H RUŠKA, František.** *SENZORY: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití.* Zlín : UTB, 2011. 978-80-7454-096-7.
2. **Kaš, J., Kodíček, M. a Valentová, O.** *Laboratorní techniky biochemie.* Praha : VSCHT Praha, 2006. 80-7080-586-2.
3. **MAJCE, Michal.** Snímače koncentrace oxidu uhličitého pro průmysl a vzduchotechniku. [Online] 2008. [Citace: 15. 7 2017.] http://www.topinstruments.cz/user-files/publikacni-cinnost/automa_co2.pdf.
4. **Marcel, KREIDL.** *Měření teploty.* Praha : BEN, 2005. 80-7300-145-4.
5. **Energy Consulting Service, s.r.o.** *Mikroklima ve veřejných budovách jako důvod instalace rekuperace.* 2011.
6. **SLAVÍKOVÁ, Jana a ŠVIGLEROVÁ, Jitka.** *Fyziologie dýchání.* Praha : Karolinum, 2012. " 978-80-246-2065-7.
7. **Siemens.** *Demand-controlled ventilation.* místo neznámé : Siemens Switzerland Ltd, 2010. 0-92166-en.
8. **Figaro Engineering Inc.** *TECHNICAL INFORMATION FOR CDM7160.* Osaka : Figaro Engineering Inc., 2016.
9. **Microrisc.** *IQRF OS reference guide.* Jičín : Microrisc s.r.o., 2017. IQRF-OS-402D_170821.
10. —. *Datasheet TR-76.* [PDF] Jičín : Microrisc s.r.o., 2018. Datasheet_TR-76D_180130.
11. **Microchip Technology Inc.** *MCP73831.* [pdf] 2014. 978-1-63276-375-4.
12. —. *MCP9800/1/2/3.* Chandler : Microchip Technology Inc., Microchip Technology Inc., 2010. 978-1-60932-662-3.
13. **Bosch.** *BME280.* Reutlingen : Bosch Sensortec, 2015. BST-BMP280-DS001-11.
14. **Abdulkadhim, H A a Hasan, T F.** *DESIGN OF A SOFTWARE SYSTEM FOR FINITE STATE.* Diyala : Diyala Journal of Enigeering and Science, 2011. 1999-8716.
15. **MICRORISC s.r.o.** *Technical guide IQRF DPA Framework.* Jičín : MICRORISC s.r.o., 2017. Tech_Guide_DPA-Framework-300_170314 .
16. **Figaro Engineering Inc.** *CO2 Sensor Module CDM7160 - Communication Specifications .* Osaka : Figaro Engineering Inc., 2016.
17. **Microchip Technology Inc.** *MCP1700.* [online] Chandler : Microchip Technology Inc., 2007. DS21826B.
18. —. *MCP72821.* [pdf] 2014. ISBN: 978-1-63276-375-4.

Seznam příloh

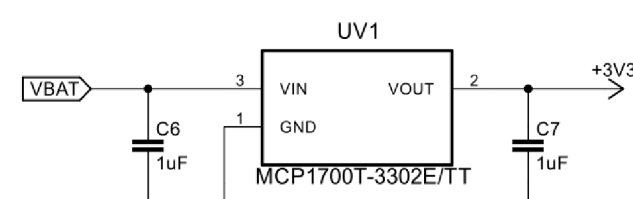
- Příloha A: Schéma zapojení RMCD - 1 strana A3
- Příloha B: Schéma zapojení CO₂-EVAL - 1 strana A4
- Příloha C: Schéma zapojení BME280-EVAL - 1 strana A4
- Příloha D: Fotografie - 2 strany A4
- Příloha E: Návod k použití RMCD - 4 strany
- Příloha F: Návod k použití CO₂-EVAL - 4 strany
- Příloha G: Návod k použití BME280-EVAL - 4 strany
- Příloha H: Knihovna CDM7160 pro Arduino - Příloha na CD
- Příloha I: Skripty pro vyhodnocení dat - MATLAB - Příloha na CD
- Příloha J: Seznamy použitých součástek - Příloha na CD
- Příloha K: Diplom IQRF Challenge III - 1 strana A4
- Příloha L: Katalogový list senzoru MCP9802 - Příloha na CD - 42 stran
- Příloha M: Katalogový list senzoru BME280 - Příloha na CD - 54 stran
- Příloha N: Katalogový list převodníku úrovní TXS0104 - Příloha na CD - 35 stran
- Příloha O: Katalogový list senzoru Figaro CDM7160 - Příloha na CD - 39 stran
- Příloha P: Katalogový list LDO Stabilizátoru MCP1700 - Příloha na CD - 24 stran
- Příloha Q: Projekt RMCD – IQRF IDE - Příloha na CD
- Příloha R: Program v prostředí Node-RED - Příloha na CD



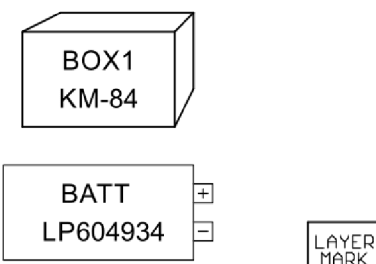
Power management



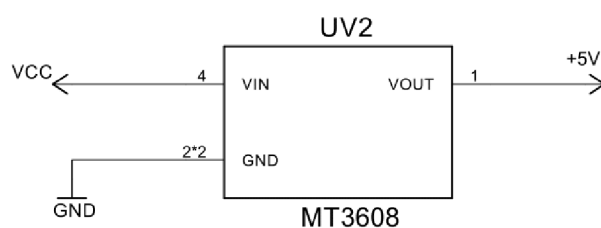
LDO



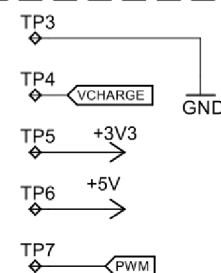
Other



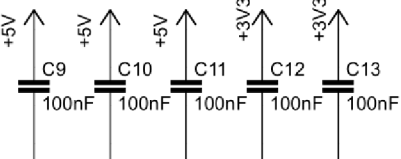
DC/DC boost



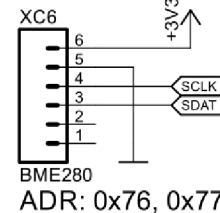
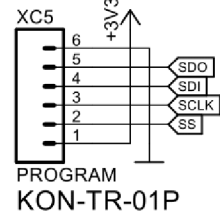
Test points



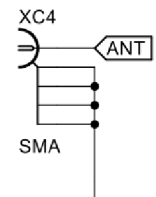
Bypass Capacitors



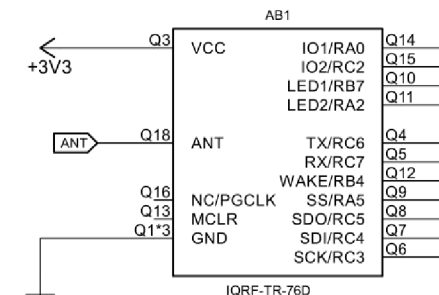
Connectors



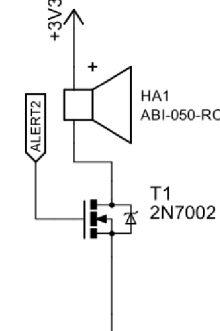
ANT CONN.



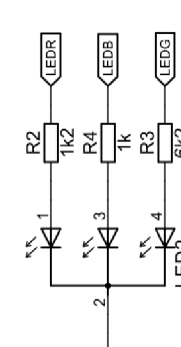
TR-76



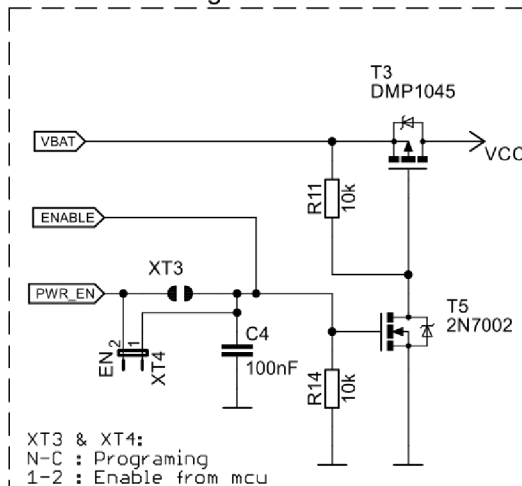
Hooter



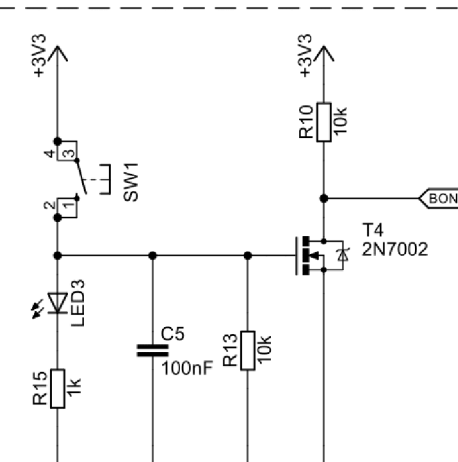
LED



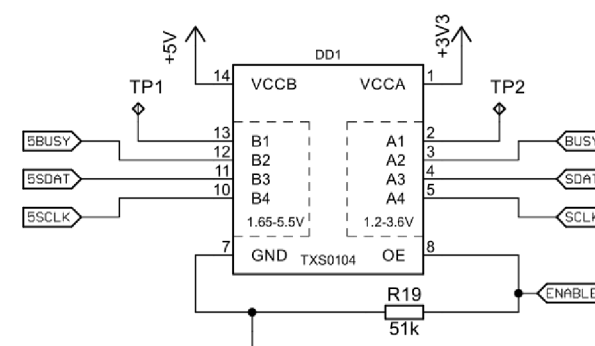
Power switching circuit



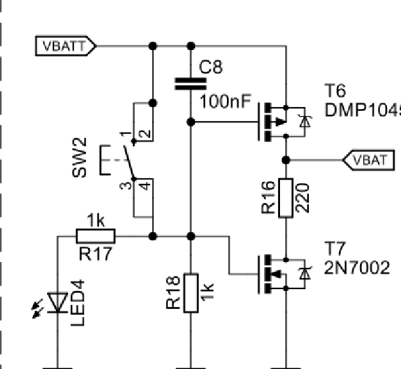
Bond button circuit



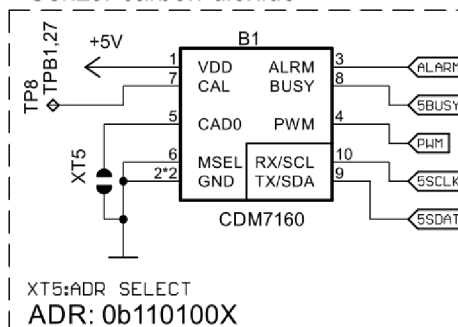
Voltage level translator



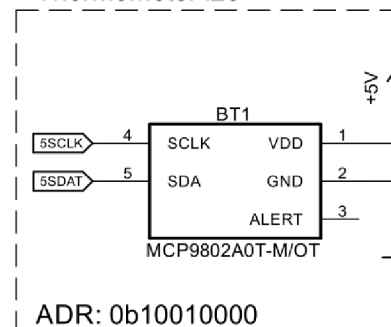
Reset circuit



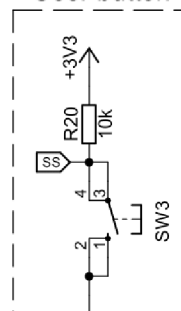
Senzor carbon-dioxide

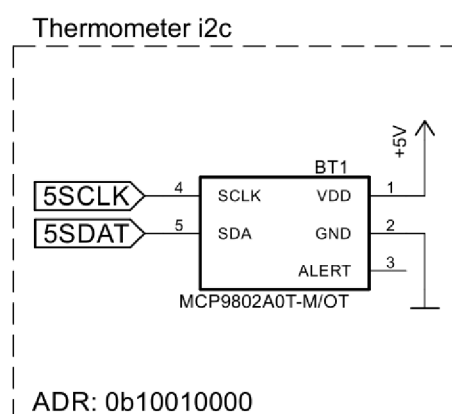
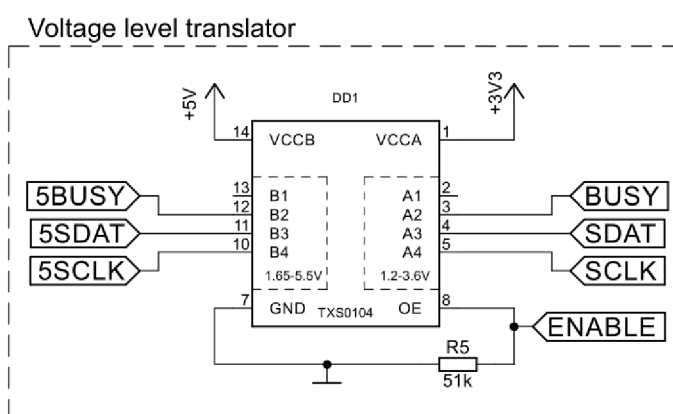
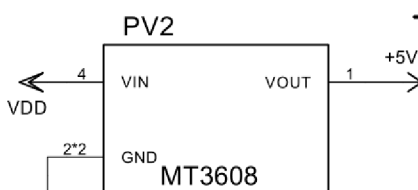
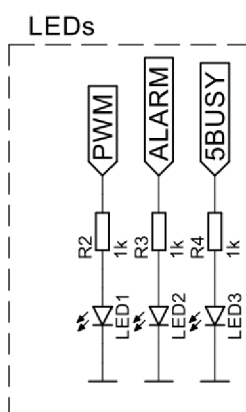
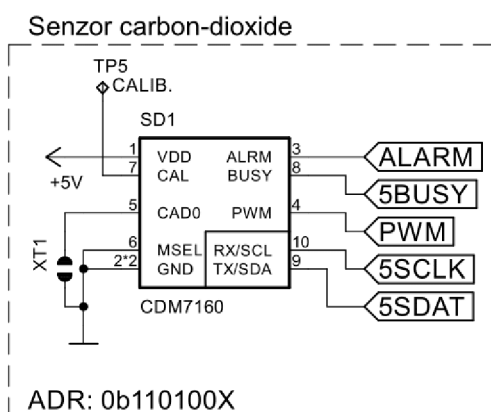
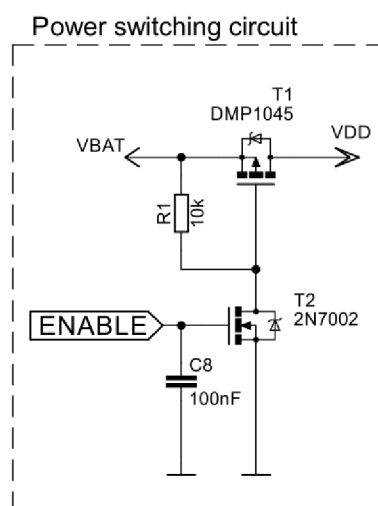
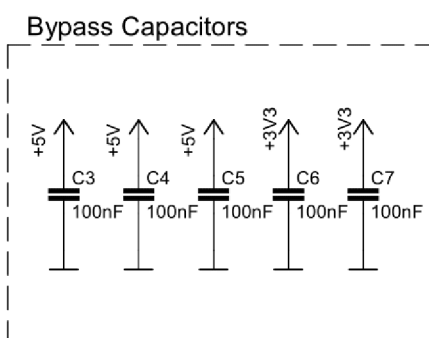
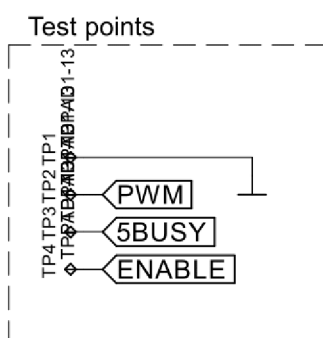
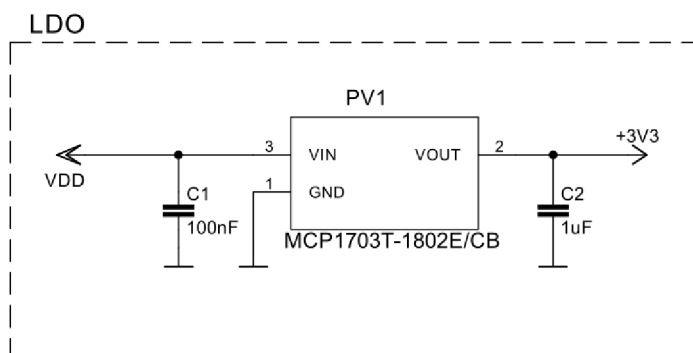


Thermometer i2c

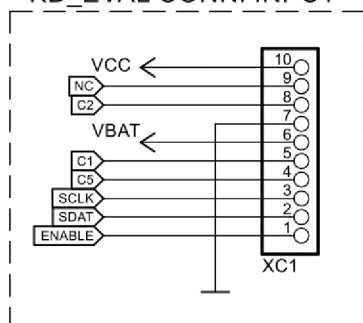


User button

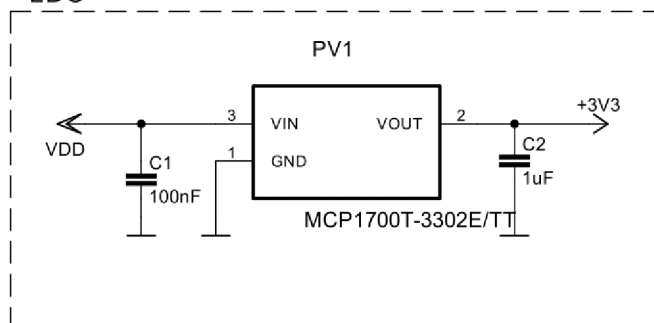




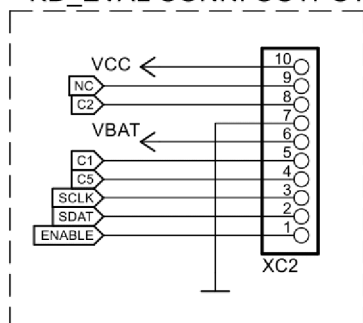
KD_EVAL CONN. INPUT



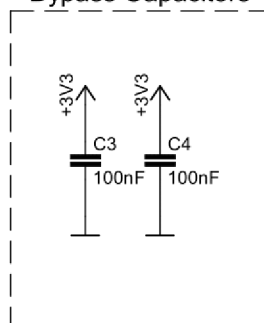
LDO



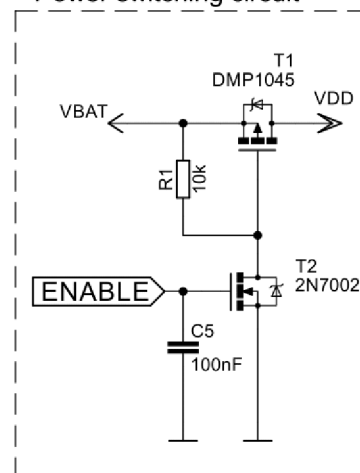
KD_EVAL CONN. OUTPUT



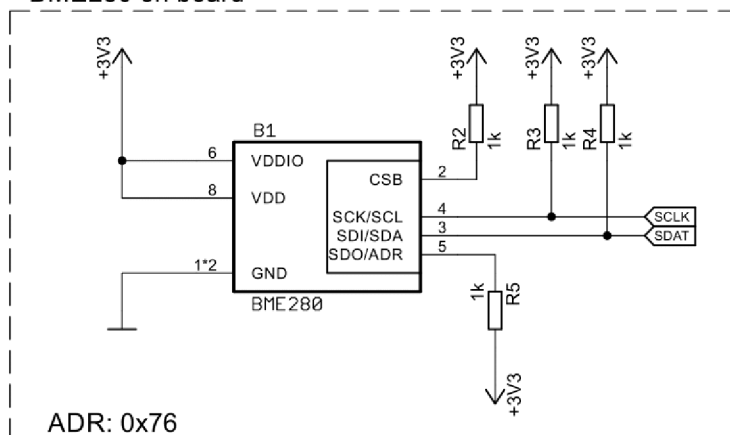
Bypass Capacitors



Power switching circuit

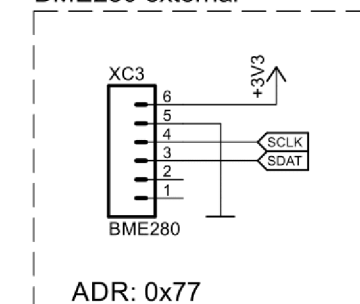


BME280 on board



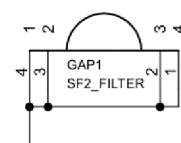
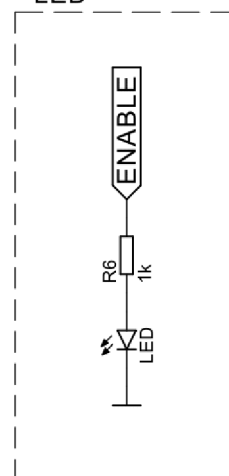
ADR: 0x76

BME280 external



ADR: 0x77

LED



TITLE: DDC board for BME280

Příloha C

SN: 4-2017-USB-VEL0069-05

Design: Jan Velicka

Project: BME280-EVAL-IQRF_v2

Save: 17. 3. 2018 16:32:20

Sheet: 1/1

REV: D

A4

Příloha D: Fotografie

Fot. 1: Výukové moduly připojené k DK-EVAL.....	II
Fot. 2: Sestavená elektronika přístroje RMCD (pohled shora)	III
Fot. 3: Sestavená elektronika přístroje RMCD	III



Fot. 1: Výukové moduly připojené k DK-EVAL



Fot. 2: Sestavená elektronika přístroje RMCD (pohled shora)

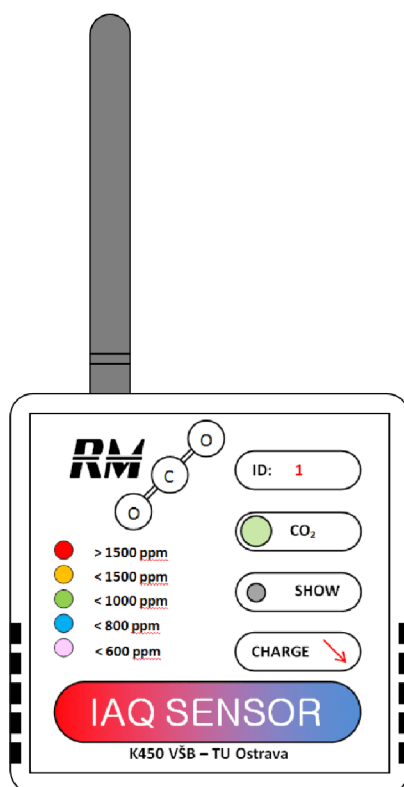


Fot. 3: Sestavená elektronika přístroje RMCD

Měřicí přístroj pro monitorování CO₂

RMCD v1.G IQRF (LITE)

Příloha E - Návod k použití



Popis

Měřicí přístroj pro monitorování koncentrace oxidu uhličitého (CO_2) a teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku v místnosti. Signalizace aktuální koncentrace CO_2 je prostřednictvím barvy RGB LED na přední straně přístroje. Tato signalizace může být trvalá nebo při stisku tlačítka. Přístroj je vybaven komunikačním rozhraním IQRF pro bezdrátový přenos naměřených dat. Přístroj nalezne uplatnění především ve školních třídách nebo místnostech kde je potřeba monitorovat stav vnitřního prostředí.

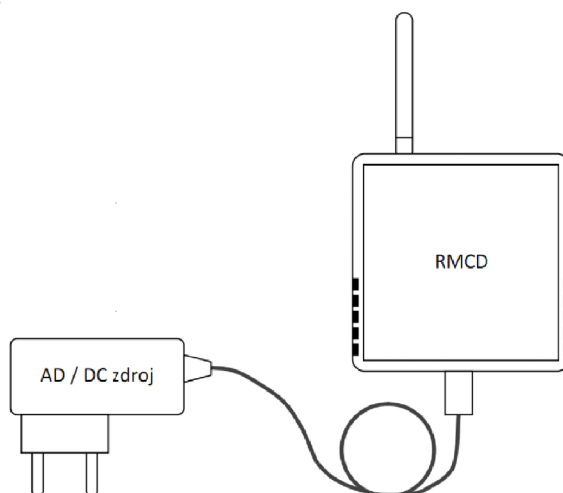
Instalace

Měřicí přístroj se zpravidla instaluje ve svislé poloze anténou směrem nahoru na zeď nebo obdobnou plochu ve výšce cca 120 cm nad podlahou. Upevnění je možné prostřednictvím vrtů nebo oboustranné samolepky. Měřicí přístroj bylo zapotřebí umístit tak aby byly omezeny nechtěné vlivy na měření. Je vhodné se řídit následujícími doporučeními.

- Přístroj nesmí být v přímém proudění vzduchu, například v bezprostřední blízkosti dveří nebo oken.
- Přístroj nesmí být v bezprostřední blízkosti zdroje CO_2 , například na stole před studenty
- Přístroj nesmí být zakryt závěsem či jinou textilií
- Přístroj nesmí být vystaven přímým tepelným účinkům. Například: chlazení přístrojů (počítače, monitory, notebooky, klimatizace), topení

Pro zprovoznění přístroje je nutné připojit konektor Li-Pol baterie do konektoru XC3 uvnitř přístroje. Po připojení se krátce rozsvítí (1 s) RGB LED na přední straně, pokud toto nenastane, je nutné připojit napájecí zdroj a několik minut počkat. V případě, že nebude přístroj delší dobu používán, je nutné odpojit baterii, aby nedošlo k jejímu poškození.

Pro napájení přístroje se doporučuje používat přiložený spínaný zdroj. Micro USB konektor pro napájení je umístěn na spodní straně přístroje. Signalizace dobíjení je červenou LED, kterou je možné vidět skrz mřížku na pravé straně přístroje.



Připojení do IQRF sítě

Pro správné fungování modulu je nutné provést zaregistrování ke koordinátorovi IQRF mesh sítě. To se provádí stiskem tlačítka BOND umístěného na zadní straně přístroje. Pro úspěšné zaregistrování je nutné aby na koordinátoru byla spuštěna funkce „Bond node“. Pro správnou funkci sítě je nutné provést mapování sítě, pomocí příkazu „Discovery“. Nejjednodušším způsobem je použít IQRF IDE kdy prostřednictvím tohoto vývojového prostředí je možné konfigurovat síť.

Komunikační protokol

Pro komunikaci je využíván DPA protokol s implementovaným „Custom DPA handler“, který je nástavbou základního DPA protokolu. Je využívána uživatelská periferie a EEPROM.

Vyčtení hodnoty (lite verze HWPID: 0x1235)

Přístroj pro měření koncentrace CO₂ odesílá 4 Byty dat. V prvních 2 Bytech je změřená hodnota koncentrace CO₂ ve druhých 2 Bytech je změřená teplota. Předpokladem úspěšného dotazování je, aby byl přístroj zaregistrován (Bond) ke koordinátorovi sítě. Na tento snímač se poté zašle následující DPA paket.

DPA request - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)
01	00	20	00	1F	FF

DPA response - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPI D (Lo)	HWPI D (Hi)	ErrN	DPA value	CO2 value (Lo)	CO2 value (Hi)	TEMP value (Lo)	TEMP value (Hi)
01	00	20	80	1F	FF	00	55	5A	02	80	1B

Obsah Bytů „CO2 value“ je hodnota změřené koncentrace senzorem CDM7160. Je složena ze dvou Bytů, kde jejich obsah přímo odpovídá hodnotě koncentrace v ppm. Výsledný přepočtení na koncentraci je možný vypočítat dle následující rovnice.

$$255 \cdot CO2_{HI} + CO2_{LO} = C_{CO2} \text{ (ppm)}$$

Kde : CO_{2HI} - horní Byte CO2 value
CO_{2LO} - dolní Byte CO2 value

Obsah bytů „TEMP value“ je hodnota změřené teploty senzorem MCP9802. Je složena ze dvou Bytů, kde jejich obsah přímo odpovídá teplotě. Výsledný přepočtení na teplotu ve °C je možný vypočítat dle následující rovnice. Bity jsou indexovány od LSB.

$$(1 - T_{HI}[7]) \cdot (T_{HI}[0:6] + T_{LO} \cdot 2^{-8}) - (T_{HI}[7]) \cdot (T_{HI}[0:6] + T_{LO} \cdot 2^{-8}) = T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Kde : T_{HI} - horní Byte TEMP value
T_{LO} - dolní Byte TEMP value

Nastavení RGB LED

Tento měřicí přístroj se nastavuje pomocí zápisu do EEPROM. Předpokladem úspěšného zápisu je, aby byl snímač zaregistrován ke koordinátorovi IQRF sítě. Nastavení se provádí změnou hodnoty „VALUE“, kde 1 je zapnuto a 0 je vypnuto. Koordinátor poté zašle následující DPA paket.

Nastavení signalizace koncentrace CO₂ pomocí RGB LED - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	EEPROM ADDR	VALUE
01	00	03	01	1F	FF	01	01

Nastavení signalizace vyčtení dat pomocí bliknutí RGB LED - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	EEPROM ADDR	VALUE
01	00	03	01	1F	FF	02	01

Indikované koncentrace CO₂

< 600 ppm	600 – 799 ppm	800 - 999 ppm	1000 - 1499 ppm	≥ 1500 ppm *
Venkovní prostředí	Vyvětraná místnost	Doporučená koncentrace	Akceptovatelná koncentrace	Nutno vyvětrat

*Při překročení koncentrace CO₂ 5000 ppm je spuštěna zvuková signalizace.

Chyby měření

Veličina	Chyba měření
Koncentrace CO ₂	± (50 ppm + 3 % rdg) v rozsahu 300 – 5000 ppm
Teplota	± 1 °C

Pracovní prostředí

Veličina	Podmínka
Relativní vlhkost	0 – 85 %, nekondenzující
Teplota	0 - 50 °C

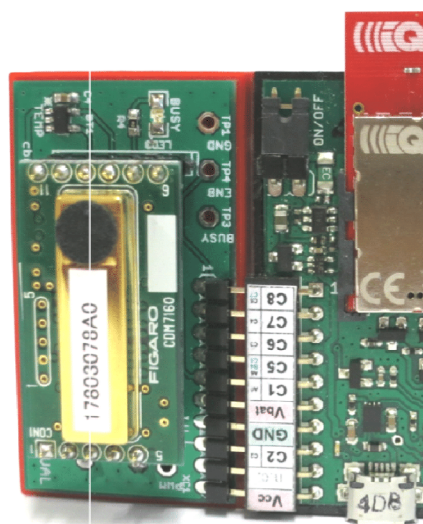
Vlastnosti

Napájení	5 V micro USB, max. 500 mA
Bezdrátový přenos	IQRF MESH, 868 MHz
Stupeň krytí	IP 20
Třída ochrany	III. SELV , adaptér II.
Rozměry	70 mm × 70 mm bez antény, anténa 85 mm
Bateriový provoz	až 32 hodin bez RGB LED, až 18 hodin s RGB LED.
Baterie	Li – Pol 3,7 V; 1050 mAh

Výukový a prezentační modul

CO₂ – EVAL (v2)

Příloha F - Návod k použití

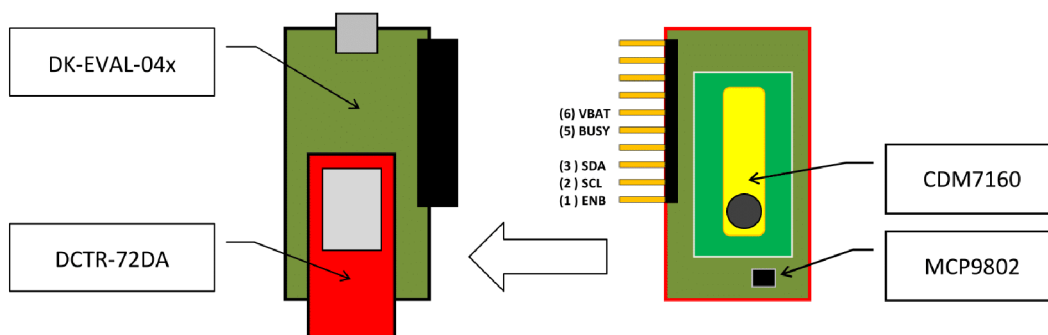


Popis

Modul slouží jako výukový a demonstrační přípravek pro podporu výuky v oblasti návrhu a realizace měřicích systémů pro měření environmentálních veličin. Výukový modul je osazen senzorem koncentrace oxidu uhličitého (CO₂) CDM7160 od společnosti Figaro. Daný snímač je kalibrovaný výrobcem a je typu NDIR. Měřená koncentrace CO₂ je přímo v jednotkách ppm. Další měřenou veličinou je teplota, která je měřena senzorem MCP9802 od firmy Microchip. Modul je vybaven ovládáním napájení. Celý modul je svými rozměry a připojením koncipován tak, aby mohl být zařaditelný do vývojového řetězce (DDC), tedy jako rozšíření portfolia vývojových sad od firmy Microrisc, s.r.o.

Instalace

Modul se připojuje pomocí pinového konektoru k DK-EVAL. Napájení modulu je 3,6V baterii z DK-EVAL. Za účelem testování se modul vybaven testovacími body. Pro demonstraci je modul vybaven LED které signalizují stavy výstupů senzoru CDM7160.



Pro měření je nutné nejprve zapnout napájení modulu přivedením logické 1 na pin ENB. Komunikace se senzory je pomocí sběrnice I²C. Projevem správné funkce je blikání LED BUSY a svícení LED PWM (intenzita dle koncentrace CO₂).

Senzor	I ² C Adresa
MCP9802A0	10010000
CDM7160	11010000

Připojení do IQRf sítě

Pro správné fungování modulu je nutné provést zaregistrování ke koordinátorovi IQRf mesh sítě. To se provádí stiskem tlačítka SW1 (BOND) umístěného na DK-EVAL. Pro úspěšné zaregistrování je nutné aby koordinátor byl v režimu „Bond node“. Pro správnou funkci sítě je nutné provést mapování sítě, pomocí příkazu „Discovery“. Nejjednodušším způsobem je použít IQRf IDE kdy prostřednictvím tohoto vývojového prostředí je možné konfigurovat síť.

Komunikační protokol

Pro komunikaci je využíván DPA protokol s implementovaným „Custom DPA handler“, který je nástavbou základního DPA protokolu. Je vyžívána uživatelská periferie (0x20).

Program

Základem je využití programu „CustomDPAhandler-CDM7160-CO2“. Tento program je možné modifikovat dle potřeb. Následující popis odpovídá použití vzorového programu.

Vyčtení hodnoty

Výukový modul pro měření koncentrace CO₂ prostřednictvím (DC)TR-72 odesílá 4 Byty dat (PDATA) jako součást odpovědi (response) na základě požadavku (request) od koordinátora sítě. V prvních 2 Bytech je změřená hodnota koncentrace CO₂ ve druhých 2 Bytech je změřená teplota. Popis ostatních Bytů je uveden v manuálu DPA protokolu (Tech_Guide_DPA-Framework).

DPA request - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)
01	00	20	00	1F	FF

DPA response - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	DPA value	CO2 value (LO)	CO2 value (HI)	TEMP value (LO)	TEMP value (HI)
01	00	20	80	1F	FF	00	55	5A	02	80	1B

Obsah Bytů „CO2 value“ je hodnota změřené koncentrace senzorem CDM7160. Je složena ze dvou Bytů, kde jejich obsah přímo odpovídá hodnotě koncentrace v ppm. Výsledný přepočet na koncentraci je možný vypočítat dle následující rovnice.

$$255 \cdot CO2_{HI} + CO2_{LO} = C_{CO2} \text{ (ppm)}$$

Kde : CO_{2HI} - horní Byte CO2 value
CO_{2LO} - dolní Byte CO2 value

Obsah bytů „TEMP value“ je hodnota změřené teploty senzorem MCP9802. Je složena ze dvou Bytů, kde jejich obsah přímo odpovídá teplotě. Výsledný přepočet na teplotu ve °C je možný vypočítat dle následující rovnice. Bity jsou indexovány od LSB.

$$(1 - T_{HI}[7]) \cdot (T_{HI}[0:6] + T_{LO} \cdot 2^{-8}) - (T_{HI}[7]) \cdot (T_{HI}[0:6] + T_{LO} \cdot 2^{-8}) = T \text{ (}^{\circ}\text{C)}$$

Kde : T_{HI} - horní Byte TEMP value
T_{LO} - dolní Byte TEMP value

Informativní koncentrace CO₂

< 600 ppm	600 – 799 ppm	800 - 999 ppm	1000 - 1499 ppm	≥ 1500 ppm
Venkovní prostředí	Vyvětraná místnost	Doporučená koncentrace	Akceptovatelná koncentrace	Nutno vyvětrat

Chyby měření

Veličina	Chyba měření
Koncentrace CO ₂	± (50 ppm + 3 % rdg) v rozsahu 300 – 5000 ppm
Teplota	± 1 °C

Pracovní prostředí

Veličina	Podmínka
Relativní vlhkost	0 – 85 %, nekondenzující
Teplota	0 - 50 °C

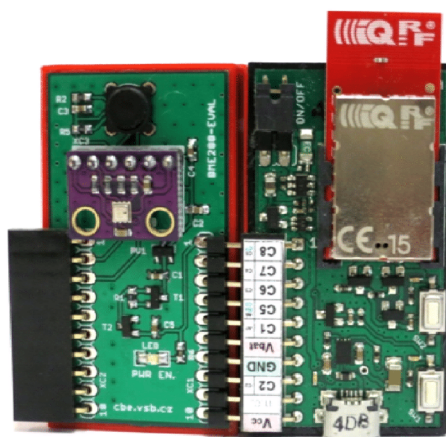
Vlastnosti

Napájení	3 – 5 V I _{max} = 100 mA
Bezdrátový přenos	IQRF MESH, 868 MHz
Stupeň krytí	IP 00
Třída ochrany	III. SELV
Rozměry	48 mm × 27 mm bez konektoru, výška 30 mm
Bateriový provoz	až 12 hodin
Baterie	Interní v DK-EVAL

Výukový a prezentační modul

BME280 – EVAL

Příloha G - Návod k použití

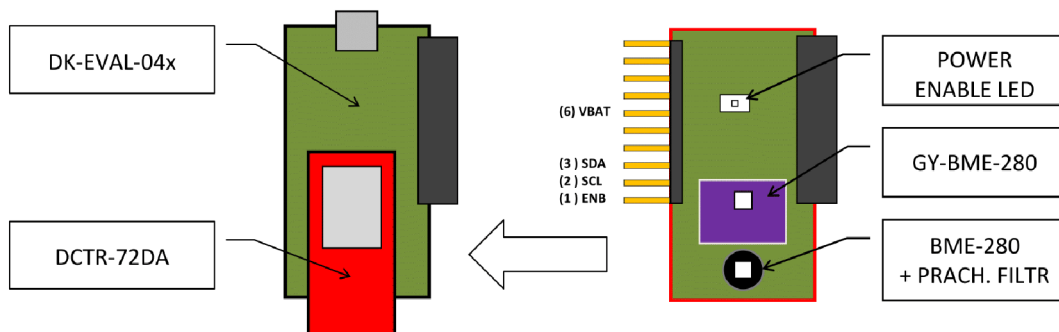


Popis

Modul slouží jako výukový a demonstrační přípravek pro podporu výuky v oblasti návrhu a realizace měřicích systémů pro měření environmentálních veličin. Výukový modul je vybaven konektorem pro připojení modulu senzoru GY-BME-280 a senzorem BME280, který je možné doplnit o prachový filtr. Modul je vybaven ovládáním napájení s indikací. Celý modul je svými rozměry a připojením koncipován tak, aby mohl být zařaditelný do vývojového řetězce (DDC), tedy jako rozšíření portfolia vývojových sad od firmy Microrisc, s.r.o.

Instalace

Modul se připojuje pomocí pinového konektoru k DK-EVAL. Napájení modulu je 3,6V baterii z DK-EVAL. Pro demonstraci je modul vybaven LED, které signalizují stav napájení.



Pro měření je nutné nejprve zapnout napájení modulu přivedením logické 1 na pin ENB. Komunikace se senzory je pomocí sběrnice I²C.

Senzor	I ² C Adresa
GY-BME-280	0111 0110
BME-280	0111 0111

Připojení do IQRF sítě

Pro správné fungování modulu je nutné provést zaregistrování ke koordinátorovi IQRF mesh sítě. To se provádí stiskem tlačítka SW1 (BOND) umístěného na DK-EVAL. Pro úspěšné zaregistrování je nutné aby koordinátor byl v režimu „Bond node“. Pro správnou funkci sítě je nutné provést mapování sítě, pomocí příkazu „Discovery“. Nejjednodušším způsobem je použít IQRF IDE kdy prostřednictvím tohoto vývojového prostředí je možné konfigurovat síť.

Komunikační protokol

Pro komunikaci je využíván DPA protokol s implementovaným „Custom DPA handler“, který je nástavbou základního DPA protokolu. Je využívána uživatelská periferie (0x20) a RAM (0x05).

Program

Základem je využití programu „CustomDPAhandler-BME280“. Tento program je možné modifikovat dle potřeb. Je nutné modifikovat I²C adresu dle skutečně připojeného senzoru. Následující popis odpovídá použití vzorového programu.

Vyčtení hodnoty

Výukový modul BME280-EVAL prostřednictvím (DC)TR-72 odesílá 8 Bytů dat (PDATA) jako součást odpovědi (response) na základě požadavku (request) od koordinátora sítě. V prvních 3 Bytech jsou surová data atmosférického tlaku. Další 3 Byty obsahují surová data teploty a poslední 2 Byty obsahují surová data vlhkosti. Surová data je nutné přepočítat pomocí kompenzačních konstant v postprocessingu. Popis ostatních Bytů je uveden v manuálu DPA protokolu (Tech_Guide_DPA-Framework).

Příklad DPA request - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)
01	00	20	00	1F	FF

Příklad DPA response - v hexadecimálním formátu

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	DPA	REZ (Lo)	REZ (Hi)	REZ (Lo)	REZ (Hi)
01	00	20	80	1F	FF	00	55	FF	FF	FF	FF
P_raw (Lo)	P_raw (Mid)	P_raw (Hi)	T_raw (Lo)	T_raw (Mid)	T_raw (Hi)	RH_raw (Lo)	RH_raw (Hi)				
90	CE	50	20	3D	82	F2	79				

*REZ - Rezerva

Vyčtení kompenzačních konstant z RAM pomocí DPA request

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	START ADDR	BYTE COUNT
01	00	05	00	1F	FF	00	24

Příklad odpovědi DPA Response

NADR (Lo)	NADR (Hi)	PNUM	PCMD	HWPID (Lo)	HWPID (Hi)	ErrN	DPA	Dig_T1 (LO.HI)	Dig_T2 (LO.HI)	Dig_T3 (LO.HI)	Dig_P1 (LO.HI)
01	00	05	80	1F	FF	00	55	0A.6F	42.68	32.00	72.92
Dig_P2 (LO.HI)	Dig_P3 (LO.HI)	Dig_P4 (LO.HI)	Dig_P5 (LO.HI)	Dig_P6 (LO.HI)	Dig_P7 (LO.HI)	Dig_P8 (LO.HI)	Dig_P9 (LO.HI)	Dig_H1 (LO.HI)	Dig_H2 (LO.HI)	Dig_H3 (LO.HI)	Dig_H4 (LO.HI)
36.D6	D0.0B	99.1F	86.FF	F9.FF	AC.26	0A.D8	BD.10	4B.00	6B.01	00.00	3C.01
Dig_H5 (LO.HI)	Dig_H6 (LO.HI)										
32.00	1E.00										

Výsledné hodnoty je nutné vypočítat pomocí návodu v katalogovém listu Bosch BME280.

Chyby měření

Veličina	Chyba měření
Teplota	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Vlhkost	$\pm 3\text{ }\%$
Atm. tlak	$\pm 1\text{ hPa}$

Pracovní prostředí

Veličina	Podmínka
Relativní vlhkost	0 – 85 %, nekondenzující
Teplota	0 - 50 $^{\circ}\text{C}$

Vlastnosti

Napájení	3 – 5 V $I_{\max} = 10\text{ mA}$
Bezdrátový přenos	IQRF MESH, 868 MHz
Stupeň krytí	IP 00
Třída ochrany	III. SELV
Rozměry	48 mm × 27 mm bez konektorů
Bateriový provoz	až 18 hodin
Baterie	Interní v DK-EVAL

Příloha K: Diplom IQRF Challenge III



IQRF Alliance and Partners award in

IQRF Wireless Challenge III

Worldwide contest



FIRST PLACE

to

JAN VELIČKA

Prague, the Czech Republic, 8th June 2017

Šimon Chudoba
CEO, IQRF Alliance

